

# SKRIPSI

## ANALISA PERBAIKAN KUALITAS TEGANGAN AKIBAT TEGANGAN SAG DAN PHASE JUMP MENGGUNAKAN KOMPENSASI *DYNAMIC-VOLTAGE RESTORE (DVR)* PADA INDUSTRI TEKSTIL PT. COATS REJO INDONESIA



Disusun Oleh:  
**PIETER ADJI. H. P**  
NIM: 02.12.014

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO S-1  
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI LISTRIK  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG  
2010**

1971

THESE PLANNING CONCEPTS WOULD BE  
IMPLEMENTED OVER A PERIOD OF  
TIME (1970) THROUGH THE CONSTRUCTION  
AND OPERATIONAL STAGES OF THE PROJECT

THIS PROJECT  
IS A MAJOR PROJECT  
OF THE YEAR

THE PROJECT WOULD BE  
IMPLEMENTED OVER A PERIOD OF  
TIME THROUGH THE CONSTRUCTION  
AND OPERATIONAL STAGES OF THE PROJECT

## LEMBAR PERSETUJUAN

**ANALISA PERBAIKAN KWALITAS TEGANGAN AKIBAT TEGANGAN  
SAG DAN PHASE JUMP MENGGUNAKAN KOMPENSASI *DYNAMIC  
VOLTAGE RESTORE (DVR)* PADA INDUSTRI TEKSTIL  
PT. COATS REJO INDONESIA**

### SKRIPSI

*Disusun Untuk Melengkapi dan memenuhi Persyaratan Guna Mencapai Gelar  
Sarjana Teknik Elektro Strata Satu (S-1)*

Disusun Oleh:  
**PIETER ADJI. H. P**  
NIM: 02.12.014



Mengetahui,  
Ketua Jurusan Teknik Elektro S-1

Diperiksa dan Disetujui,  
Dosen Pembimbing

Ir. F. Yudi Limpraptono, MT  
NIP.Y. 103 9500 274

Ir. Yusuf Ismail Nakhoda, MT  
NIP.Y. 101 88 00189

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO S-1  
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI LISTRIK  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG  
2010**

## KATA PENGANTAR

Dengan segala rasa kerendahan hati dan puji syukur kepada Allah SWT, atas rahmat dan karunia-NYA yang telah dilimpahkan kepada penulis, sehingga masih memberikan kesempatan kepada Penulis untuk dapat mensyukuri segala nikmat-NYA. Berkat taufik serta hidayah-NYA penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul :

**“ANALISA PERBAIKAN KWALITAS TEGANGAN AKIBAT TEGANGAN SAG DAN PHASE JUMP MENGGUNAKAN KOMPENSASI *DYNAMIC VOLTAGE RESTORE* (DVR) PADA INDUSTRI TEKSTIL PT. COATS REJO INDONESIA”**, yang dalam penulisan ini penulis mencoba merepresentasikan skripsinya dengan menganalisa tegangan kedip dalam ruang lingkup produksi atau pabrik. Dalam hal ini penulis menganalisa pabrik tekstil, karena dalam skripsi ini sangat membantu dalam menganalisa terjadinya tegangan kedip.

Laporan skripsi ini merupakan salah satu syarat untuk meraih gelar Strata-1, jurusan Teknik Elektro di Institut Teknologi Nasional Malang.

Penulis sangat menyadari dalam pembuatan laporan skripsi ini, masih jauh dari nilai kesempurnaan, baik dari segi substansi maupun tata bahasa, sehingga kiranya masih banyak yang perlu diperbaiki baik dari segi substansi maupun tata bahasa sehingga kiranya masih banyak yang perlu diperbaiki. Hal ini tidak lepas dari keterbatasan penulis sebagai manusia biasa yang tidak luput dari kesalahan dan kekurangan.

Pada proses penyusunan laporan skripsi ini, penulis banyak mendapatkan bantuan dan dukungan dari banyak pihak, oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih dengan penuh rasa hormat kepada :

1. Yth.Bpk. Ir. Yusuf Ismail Nakhoda, MT selaku Dosen Pembimbing Skripsi.
2. Yth.Bpk. Ir. Sidik Noercahyono, MT selaku Dekan FTI Institut Teknologi Nasional .
3. Yth..Bpk. Ir. F. Yudi Limpraptono, MT selaku Kepala Jurusan Teknik Elektro Intitut Teknologi Nasional.
4. Yth.Bpk.. Ir. Yusuf Ismail Nakhoda, MT selaku Sekertaris Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Nasiona..
5. Yth. Ir. Teguh Herbasuki, MT selaku Dosen Wali.
6. Penulis juga mengucapkan kepada seluruh pihak yang telah membantu guna terselasaikan penulisan skripsi ini terutama kedua orang tua bapak dan ibu tercinta serta saudaraku Pawitra Bayu yang selalu memotivasi dan mendo'akan agar penulis bisa menyelesaikan skripsi dengan baik.
7. Penulis mengucapkan juga terima kasih yang sebesar-besarnya khususnya kepada keluarga yang di Jakarta Bpk.H. Lizrin Alif, Ibu Ani Lizrin, (Mbak Fanny, Mas Bas dan dik Nando) Dik Berli, dan yang terbaik dan sayang pada Dik Intan yang selalu menemani baik dalam suka maupun duka.

8. Penulis juga mengucapkan banyak terima kasih kepada segenap kawan-kawan yang membantu terutama Mansyur S. Fahan dan Arik Prasetyo yang selalu membantu menyelesaikan skripsi ini dengan tulus sehingga bisa terselesaikan dengan baik. Segenap kawan-kawan sejawat yang selalu memotivasi.

Akhir kata dengan segala keterbatasan, penulis mohon maaf yang sebesar-besarnya apabila ada tulisan yang kurang berkenaan, karena sesungguhnya penulis telah berusaha dengan keras ingin menyajikan yang terbaik. Besar harapan penulis, semoga apa yang penulis sajikan di skripsi ini dapat memberikan manfaat khususnya bagi penulis dan umumnya bagi semua pihak yang membacanya, dan semoga amal baik semua pihak yang membantu dalam penyelesaian penulisan skripsi ini mendapat pahala dan balasan dari Allah

Malang, Oktober 2009

**Penulis**

**ANALISA PERBAIKAN KWALITAS TEGANGAN AKIBAT TEGANGAN SAG  
DAN PHASE JUMP MENGGUNAKAN KOMPENSASI *DYNAMIC VOLTAGE  
RESTORE (DVR)* PADA INDUSTRI TEKSTIL PT. COATS REJO INDONESIA**

**Pieter Adji Hadi Putra**

**02.12.04**

Jurusan Teknik Elektro S-1, Konsentrasi Teknik Energi Listrik  
Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Nasional Malang  
E-mail : [panopticon.81@gmail.com](mailto:panopticon.81@gmail.com)

**Abstraksi**

**Kata Kunci** : Kedip tegangan, Pergeseran fase, *Dynamic Voltage Restorer*

Kedip tegangan (*sags*) merupakan permasalahan kualitas daya listrik yang penting. Kedip tegangan dalam banyak kasus dianggap lebih ringan akibatnya dibanding pemadaman, tetapi lebih sering terjadi. Sering kali kedip tegangan dibarengi dengan pergeseran fasa (*phase jump*), yang dalam beberapa kasus dapat mentriapkan beban sensitif. Untuk mengatasi kedip tegangan yang disertai dengan pergeseran fasa digunakanlah *Dynamic Voltage Restorer (DVR)*. Saat terjadi kedip tegangan, DVR menginjeksi sistem dengan tegangan kompensasi yang sebanding dengan tegangan yang hilang akibat kedip tegangan tersebut. Bila kompensasi tersebut sesuai maka tegangan kedip dapat diatasi dan bentuk tegangan kembali seperti yang diharapkan.

Skripsi ini membahas tentang pengontrolan DVR untuk kompensasi kedip tegangan yang disertai dengan pergeseran fase sehingga kualitas tegangan tetap baik. Sehingga konsumen tidak banyak dirugikan akibat kualitas tenaga listrik yang tidak memenuhi persyaratan untuk menjalankan mesin-mesin produksi, khususnya mesin-mesin yang menggunakan sistem kontrol modern yang sangat sensitif terhadap gangguan penurunan tegangan sesaat atau tegangan kedip, sehingga dapat menimbulkan kerusakan pada sistem kontrol mesin-mesin tersebut

*Dynamic Voltage Restorer (DVR)* dapat memulihkan tegangan dengan pergeran fasa yang diakibatkan gangguan sudut fasa ke tanah, sehingga tegangan yang turun bisa dikembalikan menjadi normal sesuai dengan tegangan sumber.

## DAFTAR ISI

<b>LEMBAR PERSETUJUAN .....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRAKSI.....</b>	<b>ii</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>iii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>iv</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>x</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xii</b>
<b>DAFTAR GRAFIK .....</b>	<b>xiv</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Tujuan Penelitian .....	3
1.3. Perumusan Masalah .....	3
1.4. Batasan Masalah.....	4
1.5. Metodologi .....	4
1.6. Sistematika .....	5
1.7. Relevansi .....	6
<b>BAB II DASAR TEORI.....</b>	<b>7</b>
2.1. Kualitas Daya Listrik .....	7
2.2. Fenomena Tegangan Kedip.....	11
2.3. Karakteristik Gangguan Tegangan Kedip .....	13
2.3.1. Besaran Tegangan Kedip Pada Sistem Radial .....	14
2.3.1.1 Level Gangguan.....	15



2.3.1.2	Jarak Kritis .....	16
2.3.1.3	Besaran Tegangan Kedip Pada Sistem Non Radial .....	16
2.3.1.4	Generator Lokal .....	16
2.3.1.5	Subtransmisi Loop .....	17
2.3.1.6	Cabang-cabang Dari Loop .....	18
2.3.1.7	Besaran Tegangan Kedip Pada Sistem Mesh .....	19
2.3.1.8	Durasi Tegangan Kedip .....	20
2.3.1.9	Fault Clearing Time .....	20
2.4.	Penyebab <i>Tegangan Kedip</i> .....	22
2.4.1.	Gangguan Hubungan Singkat .....	23
2.4.2.	Operator A.....	26
2.4.3.	Rangkaian Simetri Bintang dan Delta .....	27
2.5.	Jenis Gangguan Hubung Singkat .....	29
2.5.1.	Hubung Singkat 1 Fasa Ke Tanah .....	32
2.5.2.	Hubung Singkat Fasa ke Fasa .....	34
2.5.3.	Hubung Singkat 2 Fas Ke Tanah .....	36
2.6.	Estimasi Karakteristik Gangguan.....	40
2.6.1.	Fariasi Amplitudo dan Durasi.....	41
2.6.2.	Pergeseran Phase (Phase Jump).....	42
2.6.3.	Ketidak Keseimbangan Sistem .....	43
2.7.	Sensitifitas dan Karakteristik Peralatan Industri .....	44
2.7.1.	Motor Listrik.....	44
2.7.2.	Kontaktor .....	46

2.7.3. Peralatan Kontrol dan Variable Speed Drive.....	47
2.7.4. AC Drive.....	47
2.7.5. DC Drive.....	49
2.7.6 Programeble Logig Controlers.....	52
2.8. Teknologi Pemulihan Tegangan Kedip.....	52
2.9. Inveter .....	53
2.9.1 Devinisi Inveter.....	53
2.9.2 Prinsip Dasar.....	54
2.9.2.1 Single Phase Half Bridge Inverter .....	54
2.9.2.2 Single Phase Full Bridge Inverter .....	55
2.9.2.3 Three Phase Inverter .....	57
2.9.3 Performasi Utama Inverter.....	60
2.9.3.1 Faktor Harmonisa Dari $n^{th}$ harmonic, $HF_n$ .....	60
2.9.3.2 Total Harmonic Distortion <i>THD</i> .....	61
2.9.3.3 Faktor Distorsi ( <i>DF</i> ) .....	61
2.9.3.4 Harmonisa Orde Terendah, LOH.....	62
2.10. Kontrol Tegangan Dari Inverter.....	63
2.10.1 Kontrol GateInverter 1 Fasa .....	63
2.10.2.1 Sinusoidal PWM.....	66
2.10.2.2 Space Vector PWM .....	67
2.9.2.2.1 Space Vector .....	68
2.9.2.2.2 Space Vector Modulation .....	71

2.9.2.2.3	Indek Modulation.....	73
2.9.2.2.4	Penentuan Sektor .....	75
2.10.2.2.5	Penentuan Waktu State .....	76
2.10.2.2.6	Pembangkitan Sinyal Switching Inverter .....	77
2.11.	Kontroler Proporsional Integral PI Controller .....	78

### **BAB III PERBAIKAN KUALITAS TEGANGAN MENGGUNAKAN**

	<b><i>DYNAMIC VOLTAGE RESTORER (DVR)</i></b> .....	<b>81</b>
3.1.	<i>Software PSCAD/EMTDC V 4.2 Power Simulation</i> .....	81
3.2.	Memulai <i>PSCAD/EMTDC Power Simulation</i> .....	82
3.3.	Sistem Pengendalian PWM Sinusoidal.....	84
3.3.1.	PWM Sinusoida .....	84
3.3.2.	Aksi Kontrol PWM Sinusoida Terhadap DVR.....	85
3.4.	Aksi Kontrol Proporsional Integral (PI).....	86
3.4.1.	Umum.....	86
3.4.2.	Prinsip-Prinsip Pengendalian Proses.....	89
3.4.3.	Prinsip Kerja Pengendali.....	89
3.4.4.	Pengendali Proporsional ( <i>Proporsional Controller</i> ).....	90
3.4.5.	Pengendali Integral ( <i>Integrator Controller</i> ).....	93
3.4.6.	Pengendali Proporsional Integral ( <i>PI Controller</i> ) .....	94
3.5.	Kompensasi DVR .....	96
3.5.1.	<i>Sistem Distribusi Tanpa Kompensasi DVR</i> .....	96
3.5.2.	<i>Sistem Distribusi Dengan Kompensasi DVR</i> .....	96

3.6. Flowchart .....	98
3.6.1. <i>Flowchart</i> Desain dan Simulasi Sistem Dengan <i>Dynamic Voltage Restorer</i> (DVR) .....	98
3.7. Input Data Dalam <i>PSCAD/EMTDC Power Simulation</i> .....	99
3.7.1. Input Data Transformator dan <i>Fixed Load</i> .....	99
3.7.2.1. Input Data Pengendali PI dan SPWM Pada DVR .....	100
<b>BAB IV HASIL DAN ANALISA HASIL .....</b>	<b>102</b>
4.1. <i>Nilai-nilai parameter yang dipakai simulasi</i> .....	102
4.2. Simulasi dan Analisis Sistem Tanpa DVR .....	102
4.3. Simulasi dan Analisis Sistem Dengan DVR.....	106
4.4. Perbandingan Magnetudo Kedip Tegangan Sebelum dan Setelah Dipasang DVR .....	111
<b>BAB IV PENUTUP .....</b>	<b>112</b>
5. Kesimpulan .....	112
6. Saran .....	112
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>xx</b>
<b>LAMPIRAN</b>	

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Gambaran Terjadinya Voltage Sag .....	13
Gambar 2.2	Model Pembagi Tegangan Untuk Tegangan Kedip .....	14
Gambar 2.3	Rangkaian Ekuivalen Dari Generator Lokal .....	14
Gambar 2.4	Rangkaian Ekuivalen Untuk Sub Sistem Loop .....	17
Gambar 2.5	Rangkaian Ekuivalen Dengan Banyak Cabang.....	19
Gambar 2.6	Gangguan Hubung Singkat Menyebabkan Tegangan Kedip.....	23
Gambar 2.7	Kondisi Peralihan Dari Double Cirkuit Menjadi Single Cirkuit Menyebabkan Tegangan Kedip.....	24
Gambar 2.8	Bentuk Gelombang Tegangan Kedip Yang Disebabkan Oleh Gangguan Jarak Jauh ( <i>7 Cycles</i> ).....	24
Gambar 2.9	Contoh Grafik Prosentase Penurunan Tegangan Akibat Hubungan Singkat .....	25
Gambar 2.10	Tiga Set Fasor Seimbang Yang Merupakan Komponen Simetri Dari Fasor Tidak Seimbang.....	27
Gambar 2.11	Impedansi Simetri:a. Terubung Bintang,b.Terubung Delta.....	28
Gambar 2.12	Komponen Urutan Positif dan Negatif Dari (a) Harus Line Dan Line-Line Bintang, (b) Arus Line-Line dan Line-Netral Delta .....	29
Gambar 2.13	Jenis-jenis Gangguan Hubung Singkat .....	30
Gambar 2.14	Notasi Pada Titik Gangguan .....	31
Gambar 2.15	Hubungan Rangkaian Urutan Rangkain 1 fasa Ketaanah .....	33

Gambar 2.16 <i>Hubung Singkat 2 Fasa</i> .....	34
Gambar 2.17 Hubungan Urutan Rangkaian 2 Fasa.....	35
Gambar 2.18 Hubung Singkat 2 Fasa Ketanah .....	36
Gambar 2.19 Rangkaian Urutant 2 Fasa Ketanah .....	37
Gambar 2.20 Rangkaian Ekivalen Kedip Tegangan Akibat Starting Motor .....	39
Gambar 2.21 Tegangan Kedip Akibat Starting Motor Induksi.....	40
Gambar 2.22 Kurve CBEMA.....	44
Gambar 2.23 Tingkat Sensitifitas Peralatan Terhadap Tegangan Kedip .....	46
Gambar 2.24 Topologi AC Motor Drive .....	48
Gambar 2.25 Topologi DC Motor Drive .....	49
Gambar 2.26 Single Phase Half Bridge Inverter.....	54
Gambar 2.27 Single Phase Full Bridge Inverter .....	56
Gambar 2.28 (a) Rangkaian Inverter 3 Phasa Dengan IGBT	
(b) Inverter 3 Phasa Dengan Prinsip Switch Mode .....	57
Gambar 2.29 Kombinasi Saklar a b c Yang Dinyatakan Dal60am State.....	58
Gambar 2.30 Bentuk Gelombang Tegangan Inverter 3 Phasa.....	60
Gambar 2.31 Single PWM.....	64
Gambar 2.32 Sinyal Simulasi PWM .....	67
Gambar 2.33 Vektor Medan Putar Pada Stator .....	70
Gambar 2.34 Space Vektor PWM.....	73
Gambar 2.35 Trajectory Vektor Tegangan Reverensi Untuk $M=0,8$ dan $M=1,15$ .....	74

Gambar 2.36	Vektor Komponen Pembentuk Vs Pada Sudut Pada Sektor 1 .....	76
Gambar 2.37	Sinyal Switching Inverter SV PWM Urutan Simetri .....	78
Gambar 2.38	Blok Diagram dan Realisasi PI Kontroler.....	79
Gambar 2.39	Contoh Pemasangan Limiter Pada Keluaran Kontroler PI.....	80
Gambar 3.1	Tampilan Utama <i>Software PSCAD/EMTDC PowerSimulation</i> ....	82
Gambar 3.2	Tampilan <i>Modul Utama</i> .....	83
Gambar 3.3	Tampilan Master Library .....	83
Gambar 3.4	Tampilan <i>Single Line</i> Sistem Sebelum Dipasang DVR Dalam <i>PSCAD</i> .....	84
Gambar 3.5	Kontroler Dan Diagram Kotaknya .....	90
Gambar 3.6	Diagram Blok Kontroler Proporsional .....	91
Gambar 3.7	Response Sebuah Pengendali Proporsional .....	92
Gambar 3.8	Blok Diagram Kontroler Integral .....	94
Gambar 3.9	Blok Diagram kotak pengendali PI .....	95
Gambar 3.10	Hubungan Input-Output Pengendali PI Dalam Fungsi Waktu .....	95
Gambar 3.11	Flowchart Pemecahan Masalah .....	98
Gambar 3.16	Tampilan Input Data Transformator .....	99
Gambar 3.17	Tampilan Input Data <i>Fixed Load</i> .....	99
Gambar 3.18	Rangkaian Pengendali PI Untuk Mengendalikan DVR .....	100
Gambar 4.1	Sistem Tanpa Dynamic Voltage Restore .....	103
Gambar 4.2	Rangkaian Dari Blok Sag Generator.....	103
Gambar 4.3	Hasil Dari Simulasi Sistem Tanpa Menggunakan DVR.....	104

Gambar 4.4	Hasil Dari Simulasi Sistem Tanpa Menggunakan DVR Dengan Hasil Diperbesar .....	105
Gambar 4.5	Sistem Dengan Menggunakan Dynamic Voltage Restore (DVR).....	107
Gambar 4.6	Rangkaian Kontrol Dynamic Voltage Restorer (DVR) Dengan Menggunakan Kontrol PI .....	108
Gambar 4.7	Hasil Dari Simulasi Sistem Dengan Menggunakan DVR.....	109



## **DAFTAR TABEL**

<b>Tabel 2.1</b>	<b>Kategori dan karakteristik gangguan mutu tenaga listrik menurut IEEE Std. 1159-1995.....</b>	<b>10</b>
<b>Tabel 2.2</b>	<b>Clearing Time dan Proteksi Cadangan.....</b>	<b>21</b>
<b>Tabel 2.3</b>	<b>Tegangan Untuk Tiap Kombinasi .....</b>	<b>59</b>
<b>Tabel 4.1</b>	<b>Magnetudo Kedip Tegangan Sebelum Dipasang DVR .....</b>	<b>104</b>
<b>Tabel 4.2</b>	<b>Magnetudo Kedip Tegangan Setelah Dipasang DVR.....</b>	<b>108</b>
<b>Tabel 4.3</b>	<b>Perbandingan Magnetudo Kedip Tegangan Sebelum dan Setelah Pemasangan DVR.....</b>	<b>111</b>

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Kualitas daya listrik adalah hal yang sangat penting bagi sistem tenaga listrik. Magnitudo, bentuk gelombang dan frekuensi tegangan adalah faktor utama dari kualitas suplai tegangan listrik. *Voltage sags* (kedip tegangan) sebagai fenomena drop tegangan akan sangat berpengaruh pada proses operasional industri atau konsumen lainnya. Pihak konsumen khususnya industri sering merasa dirugikan akibat kualitas tenaga listrik yang tidak memenuhi persyaratan untuk menjalankan mesin-mesin produksi, khususnya mesin-mesin yang menggunakan sistem kontrol modern yang sangat sensitif terhadap gangguan penurunan tegangan sesaat atau tegangan kedip, sehingga dapat menimbulkan kerusakan pada sistem kontrol mesin-mesin tersebut. Hal ini dapat menyebabkan kerugian yang sangat besar karena mesin-mesin produksi tidak beroperasi akibat dari tegangan kedip tersebut.

Drop tegangan dan durasi yang termasuk dalam katagori kedip tegangan adalah 0.1 pu sampai 0.9 pu dalam waktu 0,5 cycle sampai 1 menit [1]. Kedip tegangan umumnya disebabkan oleh gangguan dalam sistem suplai dan starting beban-beban besar. Selain drop tegangan, kedip tegangan juga dapat mengakibatkan pergeseran sudut fasa (*phase jump*) selama terjadi *sag* (kedip).

DVR (*Dinamyc Voltage Restore*) merupakan peralatan yang dipasang antara sumber dan beban dengan tujuan memperbaiki mutu tegangan di beban. DVR

mengontrol tegangan beban dengan menginjeksi amplitudo tegangan, fasa dan komponen harmonisa yang diperlukan agar tegangan di sisi beban dalam keadaan sempurna. Untuk mengkompensasi fluktuasi tegangan yang cukup besar diperlukan injeksi daya aktif, sehingga DVR memerlukan penyimpan energi (*energi storage*). VSI (*Voltage Source Inverter*) sebagai peralatan penyimpan sementara dari DVR yang mengkompensasi tegangan AC 3 fasa saat terjadi voltage sag perlu mendapatkan perhatian sehingga kualitas tegangan output menjadi baik

Metode kontrol menggunakan trafo injeksi hubungan bintang (Y), dapat mengatasi tegangan kedip akibat gangguan seimbang (Balance) dan gangguan tidak seimbang (Unbalance). Metode kontrol tersebut membandingkan tegangan rms pada beban sensitif dengan tegangan rms input. Selisih tegangan ini dimodulasi dan diteruskan ke PWM (*Pulse With Modulation*). Namun pendeteksian terjadinya tegangan kedip tidak berlangsung secara real time. Amplitudo tegangan output yang dihasilkan mengalami penurunan dibandingkan dengan tegangan output sebelum terjadi gangguan. Meskipun gangguan 3 fasa seimbang adalah hal yang terburuk, namun gangguan tersebut jarang terjadi. Gangguan yang paling sering terjadi adalah gangguan tidak seimbang, seperti gangguan 1 fasa ke tanah dan *line to line*. Untuk mengatasi tegangan kedip akibat gangguan seimbang dan gangguan tidak seimbang perlu dilakukan modifikasi pada transformator injeksi dan rangkaian pengontrol tegangan DVR. DVR harus dapat mendeteksi tegangan drop, yang mungkin timbul pada tiap

phasa dan mengkompensasi tegangan yang hilang ke tiap fase tanpa mengganggu phasa yang tidak mengalami gangguan.

Skripsi ini mensimulasikan tegangan kedip dengan lompatan fasa dan memberikan ilustrasi beberapa metode pengontrolan DVR yang berbeda dan beberapa pembatasan DVR, yang harus diikuti dalam metode pengontrolannya. Dua metode pengontrolan diberikan dengan kemampuan untuk melindungi beban dari pergeseran fasa yang tiba-tiba disebabkan lompatan fasa. Simulasi dan pengukuran memperlihatkan bagaimana tegangan kedip simetri dengan pergeseran fasa dapat dikompensasi dengan sukses.

## **1.2 Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan yang akan dicapai pada skripsi ini adalah:

1. Membuat kompensasi DVR yang dapat bekerja dengan baik mengatasi gangguan yang disebabkan oleh tegangan kedip dengan pergeseran fasa pada sistem jaringan industri.

## **1.3. Perumusan Masalah**

Permasalahan yang dibahas pada Skripsi ini adalah bila terjadi gangguan tegangan kedip disertai pergeseran fasa DVR dapat dengan cepat dan tepat menginjeksikan tegangan tanpa mengganggu fasa lain yang tidak mengalami gangguan. Tegangan kedip yang terjadi disebabkan oleh gangguan seimbang dan gangguan tidak seimbang pada beban linear. Konfigurasi rangkaian kontrol VSI diselidiki sehingga pada saat terjadi tegangan kedip DVR mampu

mengkompensasi gangguan. DVR menginjeksikan tegangan ke fasa yang mengalami gangguan sehingga tegangan pada fasa tersebut kembali normal.

#### **1.4. Batasan Masalah**

Pemodelan dalam mengatasi tegangan kedip menggunakan DVR, permasalahannya dibatasi pada :

1. Bagaimana pengaruh dari pemasangan (DVR) sebelum dan setelah terjadi gangguan tegangan kedip terhadap bentuk gelombang tegangan saluran dan beban.
2. Mekanisme kerja DVR komponen power elektronik dalam mengatasi tegangan kedip.
3. Penyimpanan energi yang digunakan pada simulasi adalah sumber DC, dan tidak membahas mekanisme penyimpanan energi pada DVR.
4. Harmonisa yang dihasilkan oleh inverter tidak dibahas dalam skripsi ini.

#### **1.5. Metodologi**

Dalam tugas akhir ini digunakan metode sebagai berikut:

1. Studi Literatur
2. Pemodelan sistem
3. Simulasi dan analisis data
4. Penulisan Laporan

## **1.6. Sistematika Pembahasan**

Adapun sistematika pembahasan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

### **BAB I PENDAHULUAN**

Berisi tentang latar belakang, tujuan , permasalahan , pembatasan masalah, sistematika penulisan, metodologi, dan relevansi.

### **BAB II DASAR TEORI**

Menjelaskan tentang teori-teori penunjang skripsi. Memaparkan jenis gangguan yang dapat menyebabkan terjadinya keding tegangan (*voltage sags*), pengaruhnya pada peralatan industri, menjelaskan tentang peralatan yang berhubungan dengan *Dynamic Voltage Restorer (DVR)* seperti inverter dan prinsip kerjanya.

### **BAB III PRINSIP KERJA DAN PEMODELAN DYNAMIC VOLTAGE RESTORER (DVR)**

Berisi penjelasan tentang metode yang dipergunakan untuk kontrol DVR, prinsip kerja *Dynamic Voltage Restorer (DVR)*.

### **BAB IV SIMULASI DAN ANALISIS**

Simulasi *Dynamic Voltage Restorer (DVR)* dengan PSCAD/EMTDC V 4.2 Power Simulation dan analisa pada sistem tenaga listrik sebelum dan sesudah pemasangan DVR.

### **BAB V PENUTUP**

Berisi tentang kesimpulan dan saran.

## **1.7. RELEVANSI**

Dari hasil simulasi dan analisa, pemodelan dari DVR nantinya diharapkan dapat mengkompensasi gangguan tegangan kedip dengan pergeseran fasa. Pemulihan tegangan output pada beban sensitif yang diinjeksikan ke sistem distribusi 3 plasa secara seri diharapkan menghasilkan tegangan dengan besar tegangan, pergeseran fasa, dan bentuk gelombang yang sama dengan tegangan sebelum terjadinya tegangan kedip.

## **BAB II**

### **DASAR TEORI**

#### **2.1 Kualitas Daya Listrik**

Penurunan kualitas daya pada sistem tenaga listrik merupakan permasalahan yang sering terjadi. Salah satu sebabnya adalah tegangan kedip (voltage sag). Tegangan kedip yang periode dan kejadiannya yang tidak tentu menjadikan tantangan tersendiri bagi para ilmuwan sistem tenaga. Dari sudut pandang ekonomi, tegangan kedip adalah masalah yang sangat berharga untuk dipelajari dan dipecahkan. Alasan utama untuk memperhatikan masalah kualitas daya listrik dengan cermat adalah kerugian finansial karena gangguan. Kerugian ekonomi akibat tegangan kedip sangat besar, khususnya untuk pelanggan industri. Kerugian finansial tidak hanya timbul akibat biaya perbaikan setelah gangguan, tetapi juga rugi-rugi karena kehilangan waktu saat diadakannya perbaikan tersebut.

Pada kenyataannya, suatu sistem penyaluran daya mempunyai fitur non-ideal yang sangat mempengaruhi kualitas daya listrik. Kualitas daya listrik yang bagus secara teknis dinilai dari kriteria-kriteria :

- Bentuk gelombang sinusoidal yang *smooth* tanpa harmonisa
- Frekwensi yang konstan bernilai 50 Hz
- Sistem tenaga listrik tiga fasa yang seimbang
- Regulasi tegangan yang ketat
- Kontinuitas pasokan daya



Diantara gangguan yang membuat kualitas daya listrik menjadi jelek adalah kedip tegangan dan pemadaman. Proses produksi secara otomatis sangat sensitif terhadap perubahan magnitudo dan fasa tegangan sumber. Meskipun gangguan tegangan tersebut berlangsung hanya dalam beberapa detik, hal itu cukup untuk membuat seluruh lini produksi terhenti sehingga membuat kerugian ekonomi yang besar, seperti membahayakan peralatan produksi itu sendiri. Contoh sektor industri yang sangat dipengaruhi gangguan adalah industri kertas, semikonduktor, perminyakan, tekstil dan industri kimia.

Dalam sistem penyediaan tenaga listrik secara umum, power quality dapat dikelompokkan menjadi dua bagian, pertama yang disebabkan oleh beban, sehingga dibatasi oleh PLN, seperti *flicker*, *harmonic*, dan tidak seimbangan tegangan. Sedangkan yang kedua adalah yang dijamin oleh PLN seperti tegangan kedip, frekuensi, dan level tegangan. Tegangan *flicker* atau kerlip tegangan merupakan depresi tegangan hubung singkat dengan batasan  $\leq 2,5\%$  untuk sistem 150 kV. Untuk sistem 70 kV batasannya  $\leq 2,75\%$ , dan untuk sistem 20 kV  $\leq 3\%$ .

Ketidak seimbangan tegangan dinyatakan sebagai perbandingan komponen tegangan urutan negatif terhadap tegangan urutan positifnya yang besarnya  $V_2/V_1 \leq 2\%$ .

Harmonisa tegangan atau arus diukur dari besarnya masing-masing komponen harmonik terhadap komponen dasarnya, dan dinyatakan dalam bentuk persennya, biasanya berupa cacat harmonisa total (Total Harmonics Distortion). Biasanya untuk sistem 150 kV, diijinkan  $\leq 1,5\%$ , untuk sistem 70 kV  $\leq$  tegangan

kerja sistem  $\leq 150$  kV, diijinkan sampai sekitar 3%, dan di bawah 70 kV, diperbolehkan melebihi 5%.

Selain memberikan batasan di atas, PLN juga memberikan jaminan mengenai *power quality* ke konsumen yaitu untuk frekuensi dengan batasan 50,5Hz – 49,5Hz, sedangkan untuk tegangan dengan batasan +10% sampai dengan -5% dari tegangan kerja.

Parameter listrik dalam keadaan peralihan, diukur berdasarkan lamanya gangguan yang terjadi (Duration of Disturbance), yakni :

- Tegangan lebih peralihan yang tajam dan bergetar : tegangan paku (*spike*) positif atau negatif 0,5–200  $\mu$ s dan bergetar sampai sekitar 16,7 ms dengan frekuensi 0,2–5 kHz atau lebih. Gangguan yang termasuk dalam jenis ini antara lain; *surge, spike, notch*, dll.
- Tegangan lebih (over voltage) di atas 110 % nominal dan drop tegangan (under voltage) di bawah 80 %, berlangsung dengan durasi 10 ms (0.5 cycle) sampai dengan 1 detik. Gangguan yang termasuk di dalamnya adalah tegangan kedip, *voltage fluctuation, flicker*, dll.
- Drop tegangan di bawah 80 % dari tegangan nominal dalam waktu yang lebih lama, sekitar 2 detik. Gangguan yang termasuk di dalamnya antara lain; *outage, blackout, interruption*.
- Tegangan kedip terjadi sementara (0,5 – 60 cycles) dan mengurangi besarnya tegangan rms, seringkali disebabkan oleh gangguan jauh (remote fault) ditempat lain pada sistem tenaga (Gambar 2.1)

**Tabel 2.1.**

**Kategori dan karakteristik gangguan mutu tenaga listrik  
menurut IEEE Std. 1159-1995**

Categories	Typical spectral content	Typical duration	Typical voltage magnitude
1.0 Transients			
1.1 Impulsive			
1.1.1 Nanosecond	5 ns rise	< 50 ns	
1.1.2 Microsecond	1 $\mu$ s rise	50 ns - 1 ms	
1.1.3 Millisecond	0.1 ms rise	> 1 ms	
1.2 Oscillatory			
1.2.1 Low frequency	< 5 kHz	0.3-50 ms	0-4 pu
1.2.2 Medium frequency	5-500 kHz	20 $\mu$ s	0-8 pu
1.2.3 High frequency	0.5-5 MHz	5 ns	0-4 pu
2.0 Short duration variations			
2.1 Instantaneous			
2.1.1 Sag		0.5-30 cycles	0.1-0.9 pu
2.1.2 Swell		0.5-30 cycles	1.1-1.8 pu
2.2 Momentary			
2.2.1 Interruption		0.5 cycles-3 s	< 0.1 pu
2.2.2 Sag		30 cycles-3 s	0.1-0.9 pu
2.2.3 Swell		30 cycles-3 s	1.1-1.4 pu
2.3 Temporary			
2.3.1 Interruption		3 s-1 min	< 0.1 pu
2.3.2 Sag		3 s-1 min	0.1-0.9 pu
2.3.3 Swell		3 s-1 min	1.1-1.2 pu
3.0 Long duration variations			
3.1 Interruption, sustained		> 1 min	0.0 pu
3.2 Undervoltages		> 1 min	0.8-0.9 pu
3.3 Overvoltages		> 1 min	1.1-1.2 pu
4.0 Voltage imbalance		steady state	0.5-2%
5.0 Waveform distortion			
5.1 DC offset		steady state	0-0.1%
5.2 Harmonics	0-100th H	steady state	0-20%
5.3 Interharmonics	0-6 kHz	steady state	0-2%
5.4 Notching		steady state	
5.5 Noise	broad-band	steady state	0-1%
6.0 Voltage fluctuations	< 25 Hz	intermittent	0.1-7%
7.0 Power frequency variations		< 10 s	

## **2.2. Fenomena Tegangan kedip.**

Kedip tegangan merupakan salah satu indeks mutu tenaga listrik (*Power Quality*). Berbeda dengan harmonisa yang bersifat kontinyu, tegangan kedip terjadi secara random dan berdampak sangat besar terutama terhadap konsumen industri yang menggunakan peralatan *flicker sensitive*.

Menurut **IEEE Std. 1159-1995**, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, kedip tegangan (voltage sag/dip) adalah suatu penurunan nilai rms tegangan yang bernilai antara 0,1 sampai 0,9 pu dari tegangan normal dengan durasi 0,5 cycle (10 ms) sampai 1 menit. Kedip tegangan sering disebut dengan voltage sag atau voltage dip, kedua istilah ini merupakan fenomena yang sama.

Definisi ANSI std. 1100-1992, voltage sag adalah reduksi tegangan rms tegangan AC, pada frekuensi daya, dengan durasi dari 0,5 cycle sampai beberapa detik

1. tegangan dapat turun dibawah level normal selama beberapa cycle dan dapat mempengaruhi beban kritis yang menyebabkan trip.
2. peralatan yang dikontrol secara elektronik, tegangan 20% dibawah normal akan menyebabkan mati.

Difinisi IEC 61000-2-8 2000 (*International Electrothechnic Commision*), tegangan kedip adalah reduksi tegangan secara mendadak terutama pada sistem suplai kelistrikan dibawah ambang kedip yang terjadi dengan interval pemulihan yang singkat.

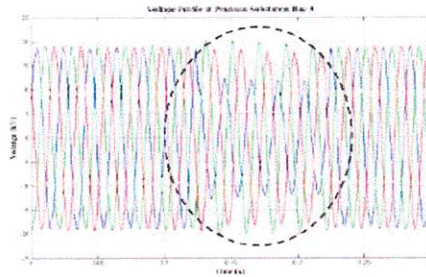
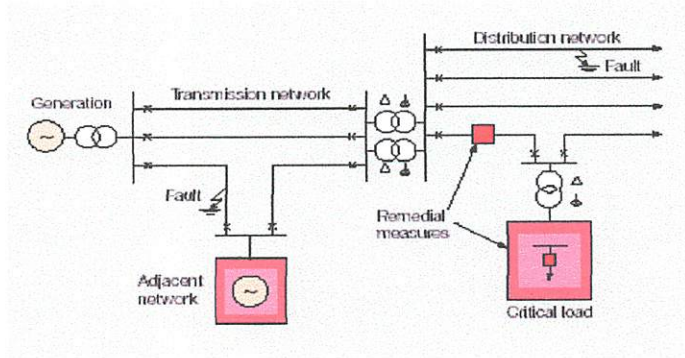
Mengenai kedalaman kedip tegangan tidak dijamin oleh PLN, karena kedalaman tegangan kedip tergantung pada jarak lokasi gangguan penyebab kedip, kekuatan (kapasitas) pasokan daya, hubungan trafo, jenis gangguan, sistem pentanahan, tegangan pragangguan, dll. Sedangkan mengenai durasi terjadinya tegangan kedip yang dijamin oleh PLN (Persero), diatur dalam edaran direksi PLN No.12.E/012/DIR/2000 tanggal 25 April 2000.

Lamanya tegangan kedip disisi pemasok dikaitkan dengan bekerjanya proteksi utama jaringan dan proteksi cadangan dijelaskan lebih lanjut pada Tabel 2.2 tentang *clearing time* proteksi utama dan cadangan.

Kedip tegangan didefinisikan sebagai fenomena penurunan amplitudo tegangan terhadap harga normalnya selama interval waktu  $t$  (0.5 – 30 cycle), sebagai akibat bekerjanya peralatan pengaman karena adanya gangguan yang terjadi baik pada jaringan transmisi/distribusi maupun pada instalasi konsumen/industri. Dengan kata lain, gangguan tegangan kedip adalah perbedaan nilai efektif tegangan dengan tegangan nominalnya selama selang waktu tertentu. Perbedaan nilai tegangan tersebut berkisar antara 10%-100% tegangan nominalnya, dan lamanya (interval waktu) berkisar antara 10 milidetik sampai dengan ratusan milidetik. Terjadinya tegangan kedip akibat *fault* dapat diilustrasikan pada Gambar 2.1.

Gangguan tegangan kedip akan hilang dengan segera setelah bekerjanya pemutus tegangan (PMT). Sedangkan yang disebut pemadaman sesaat adalah gangguan tegangan kedip 100% tegangan nominal, dan umurnya berlangsung selama interval waktu antara 1 detik sampai 1 menit. Fluktuasi tegangan yang

mengakibatkan terjadinya kedip tegangan akan menjadi masalah serius bila tingkat fluktuasinya berkisar 0.3 – 1%.



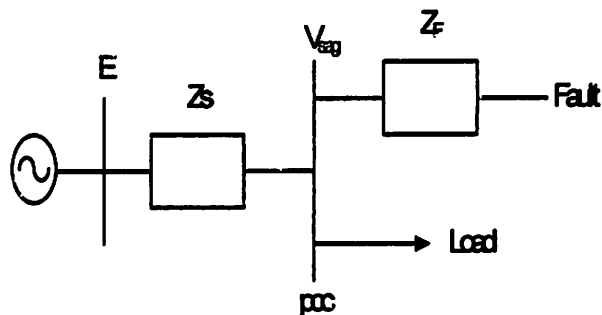
Gambar 2.1.  
Gambaran terjadinya voltage sag

### 2.3 Karakteristik Gangguan Tegangan Kedip.

Besaran dan durasi jatuh tegangan adalah 2 parameter yang menentukan karakteristik gangguan tegangan kedip. Besaran dinyatakan dalam persentasi atau per unit nilai rms tegangan, sedangkan durasi adalah interval waktu dimana tegangan mengalami penurunan.

### 2.3.1 Besaran Tegangan Kedip Pada Sistem Radial.

Untuk menghitung besaran tegangan kedip pada sistem radial dapat dilihat pada contoh model yang ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2.  
Model pembagi tegangan untuk tegangan kedip

Dari Gambar 2.2 diatas dilihat adanya 2 impedansi yaitu;  $Z_s$  (impedansi sumber pada titik kopling bersama) dan  $Z_f$  (impedansi antara titik kopling bersama dan gangguan). Titik kopling bersama (*point of common coupling* atau *pcc*) adalah titik dimana cabang-cabang arus beban dalam posisi off dari arus gangguan. Jadi besaran kedip tegangan dinyatakan dengan persamaan:

$$V_{sagas} = \frac{Z_f}{Z_s + Z_f} \dots\dots\dots(2.1)$$

Persamaan 2.1 dapat digunakan untuk menghitung besaran tegangan kedip sebagai fungsi dari jarak terhadap gangguan. Karenanya dinyatakan  $Z_f = Z * L$ , dimana  $Z$  adalah impedansi dari saluran per unit panjang dan  $L$  adalah jarak antara kesalahan dan *pcc*.

Besaran tegangan kedip sebagai fungsi dari jarak terhadap gangguan dinyatakan dengan persamaan:

$$V_{\text{sags}} = \frac{zL}{Z_s + zL} \dots\dots\dots (2.2)$$

Besar tegangan kedip meningkat seiring dengan peningkatan jarak gangguan dan meningkatnya level gangguan.

### 2.3.1.1 Level Gangguan

Seringkali impedansi sumber tidak terdapat pada bus tertentu tetapi level gangguan terdapat pada bus tersebut. Dapat juga level gangguan dianggap sebagai impedansi sumber dan digunakan persamaan 2.1 untuk menghitung besaran tegangan kedip. Hubungan antara level gangguan dan impedansi sumber dinyatakan dengan persamaan

$$S_{\text{FLT}} = \frac{Z_F}{Z_s + Z_F} \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana:  $S_{\text{FLT}}$  = level gangguan pada posisi kesalahan dan  $S_{\text{pcc}}$  pada titik kopling bersama.

$V_n$  = Tegangan sumber.



Besaran tegangan kedip pada transformator dinyatakan dengan persamaan:

$$V_{\text{sag}} = 1 - \frac{S_{\text{FLT}}}{S_{\text{pcc}}} \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana  $S_{\text{pcc}}$  = tegangan pada PCC =  $\frac{V_n}{Z_s}$

**2.3.1.2 Jarak Kritis**

Jarak kritis dinyatakan sebagai besaran pada pcc yang mengalami drop dibawah tegangan kritis (V) ketika terjadi gangguan. Jarak kritis dapat dinyatakan dengan persamaan:

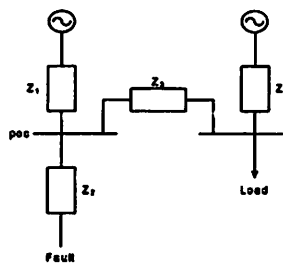
$$L_{\text{crit}} = \frac{Z_s}{Z} + \frac{V}{1-V} \dots\dots\dots(2.5)$$

**2.3.1.3 Besaran Tegangan Kedip Pada Sistem Non-Radial**

Sistem radial banyak digunakan pada jaringan tegangan rendah dan tegangan menengah untuk level tegangan yang lebih tinggi digunakan suplay tegangan yang lain

**2.3.1.4 Generator Lokal**

Rangkaian ekuivalen dari generator lokal ditunjukkan pada Gambar 2.3 di bawah :



Gambar 2.3.  
Rangkaian ekuivalen dari generator lokal

Drop tegangan pada bus generator dinyatakan dengan persamaan:

$$(1 - V_{\text{jag}}) = \frac{Z_4}{Z_3 + Z_4} (1 - V_{\text{pcc}}) \dots\dots\dots(2.6)$$

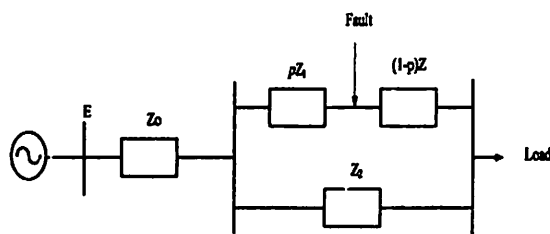
Dimana :  $Z_4$  = impedansi dari generator local selama terjadi gangguan

$Z_1$  = impedansi sumber pada pcc

$Z_2$  = impedansi antara gangguan dan pcc

### 2.3.1.5 Subtransmisi Loop

Suatu jaringan terdiri dari beberapa loop pada level subtransmisi. Sistem transmisi terhubung dengan sistem subtransmisi melalui 2 atau lebih transformator. Untuk menghitung besarnya kedip tegangan perlu diketahui bus beban, cabang-cabang yang terjadi gangguan dan cabang-cabang yang tidak terjadi gangguan. Rangkaian ekivalen untuk subtransmisi loop ditunjukkan pada Gambar 2.4



Gambar 2.4.  
Rangkaian ekivalen untuk subsistem loop

Tegangan pada bus beban dinyatakan dengan persamaan:

$$V_{sag} = \frac{p(1-p)Z_1^2}{Z_0(Z_1 + Z_2) + pZ_1Z_2 + p(p-p)Z_1^2} \dots\dots\dots(2.7)$$

**2.3.1.6 Cabang-cabang Dari Loop**

Saat beban diambil dari loop maka gangguan yang terjadi pada cabang yang jauh dari loop tersebut akan menyebabkan terjadinya kedip tegangan. Impedansi sumber lebih kecil ketika *circuit breaker* (CB) *normally open* saat terjadi kedip pada suatu level tegangan menengah rangkaian ekuivalen dari sistem tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.5.

Tegangan kedip yang terjadi pada bus beban lebih kecil dari pada gangguan yang terjadi pada level tegangannya. Tegangan pada bus beban dinyatakan dengan persamaan:

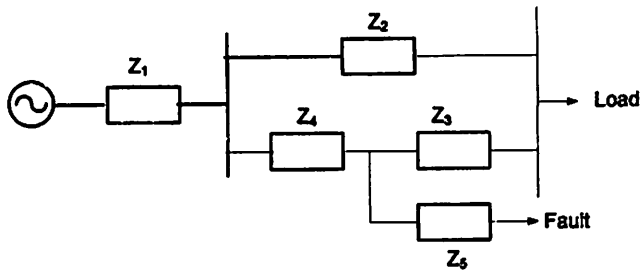
$$V_{sag} = \frac{Z_3Z_2 + Z_3Z_3 + Z_3Z_4 + Z_3Z_3}{Z_1Z_2 + Z_1Z_3 + Z_1Z_4 + Z_3Z_2 + Z_3Z_3 + Z_3Z_4 + Z_4Z_2 + Z_4Z_3} \dots\dots(2.8)$$

Dimana :  $Z_1$  : Impedansi sumber pada bus subtransmisi utama

$Z_2$  : impedansi antara bus beban dan bus subtransmisi utama

$Z_3$  : impedansi antara bus beban dan bus gangguan

$Z_4$  dan  $Z_5$  : impedansi antara bus beban dan bus subtransmisi utama



Gambar 2.5.  
Rangkaian ekivalen dengan banyak cabang

### 2.3.1.7 Besaran Tegangan Kedip Pada Sistem Mesh

Perhitungan tegangan selama terjadinya gangguan didasarkan pada teori yaitu: teori superposisi thevenin, dan matrik node impedansi.

Menurut teori thevenin, tegangan dan arus selama terjadinya kedi tegangan merupakan jumlah dari tegangan dan arus sebelum kejadian, serta tegangan dan arus yang menyebabkan perubahan tegangan pada posisi gangguan. Tegangan dan arus sebelum gangguan diakibatkan oleh generator pada sistem. Tegangan kedip pada sistem menurut teori superposisi *thevenin* dinyatakan dengan persamaan:

$$V_{sag} = V_{pcc}^{(0)} - \frac{Z_s}{Z_s + Z_f} \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana:  $V_{pcc}^{(0)}$  : tegangan sebelum gangguan pada pcc

$V_f^{(0)}$  : tegangan sebelum gangguan pada titik gangguan

Tegangan node adalah tegangan antara sebuah node dan node referensi. Arus node sama dengan jumlah dari semua arus yang melewati node. Untuk sistem mesh dibutuhkan suatu matrik guna menghitung tegangan selama terjadinya gangguan.

### 2.3.1.8 Durasi Tegangan Kedip.

Secara umum gangguan yang terjadi pada sistem transmisi dapat lebih cepat diatasi daripada gangguan pada sistem distribusi. Durasi kedip tegangan sebagian besar ditentukan oleh *fault clearing time* (waktu yang diperlukan oleh peralatan pengaman untuk mengatasi gangguan), tetapi bisa juga lebih lama dari *fault clearing time*.

### 2.3.1.9 Fault Clearing Time

Berikut ini gambaran *fault clearing time* dari beberapa macam peralatan pengaman:

- |                                    |                       |
|------------------------------------|-----------------------|
| 1. Fuse arus                       | : kurang dari 1 cycle |
| 2. Fuse <i>expulsion</i>           | : 10-1000 ms          |
| 3. Rele jarak dengan pemutus cepat | : 50-100 ms           |
| 4. Rele jarak pada zone 1          | : 100-200 ms          |
| 5. Rele jarak pada zone 2          | : 200-500 ms          |
| 6. Rele differensial               | : 100-300 ms          |
| 7. Rele arus lebih                 | : 200-2000 ms         |

Pada Tabel 2.2 diperlihatkan beberapa *fault clearing time* yang dipakai oleh PLN pada sistem Jawa-Bali.

Tabel 2.2

Clearing time proteksi dan cadangan

Bagian Jaringan	Proteksi Utama		Proteksi Cadangan	
	Jenis	Fault clearing time	Jenis	Fault Clearing Time
SUTET	2 buah distance + teleproteksi	90 ms	2 buah distance	90 ms
SUTT 150 KV	Distance+eleproteksi	120 ms	OCR/GFR	150 ms pada ganggun di remote bus
SUTT 70 kV	Distance	150 ms	OCR/GFR	1500 ms pada ganggun di remote bus
Trafo Distribusi 150/20 kV, 70/20 kV	Gangguan internal Diff REF 150 kV Diff. REF 70 kV Gangguan eksternal OCR/CFR/SBE F	120 ms 150 ms 100 ms pada ganggun di bus 20 kV	Gangguan internal; OCR 150 kV OCR 70 kV Gangguan eksternal; OCR primer	1000 ms 1000 ms 1000 ms
Feeder/ Penyulang	OCR/GFR	500 ms pada ganggu-an dekat buss	OCR/GFR sekunder trafo	1000 ms pada ganggun di bus 20 kV
Busbar	Buspro 500 kV Buspro 150 kV Buspro 70 kV	90 ms 120 ms 150 ms	Remote buck up	500 ms

Pengurangan dari *fault clearing time* tidak akan mengurangi banyak event tetapi hanya mengurangi akibat yang ditimbulkan oleh gangguan tersebut dan tidak dapat mengurangi durasi dari gangguan. *Fault clearing time* yang cepat

tidak akan mempengaruhi banyaknya kedip tegangan tetapi dapat memberikan batas bagi durasi dari kedip tegangan.

Melihat lamanya *fault clearing time* jaringan tegangan menengah (20 kV), maka sebaiknya industri yang bersekala besar, khususnya yang menggunakan peralatan yang peka terhadap tegangan kedip.

Hal yang perlu dicatat adalah bahwa pada sistem Jawa-Bali dioperasikan *auto recloser* dengan maksud agar pelepasan penghantar akibat gangguan temporer dapat dikurangi. Namun disisi lain akan menimbulkan dua kali tegangan kedip, jika gangguan itu bersifat permanen, yakni kedip pertama saat gangguan terjadi, dan kedip kedua saat *recoiser* menutup.

Durasi kedip tegangan yang terjadi tergantung dari cepat pemutusan gangguan (*fault clearing*), yang terjadi dari kecepatan kerja (*operating time*) rele, dan kecepatan membuka pemutus tenaga (*circuit breaker*), serta waktu pengiriman sinyal teleproteksi.

#### **2.4 Penyebab Tegangan Kedip**

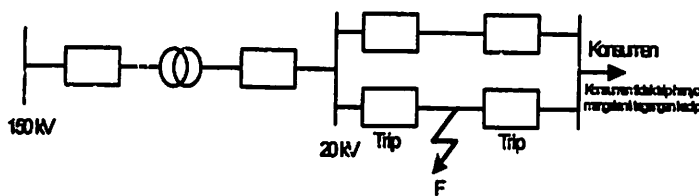
Dari studi yang telah banyak dilakukan oleh para pakar listrik, menunjukkan bahwa tegangan kedip dapat disebabkan oleh berbagai macam kejadian di sistem tenaga, antara lain:

- a. Gangguan hubungan singkat, baik yang terjadi di instalasi itu sendiri ataupun yang terjadi di penyulang lain.
- b. Surja alih-hubung akibat pengoperasian pemutus tenaga di saluran tenaga tegangan tinggi atau sistem distribusi.

- c. Perubahan beban yang cukup besar secara tiba-tiba.
- d. Karakteristik pembebanan kosumen, seperti: starting motor kapasitas besar, mesin potong logam berkapasitas besar.
- e. Energizing transformator.

#### 2.4.1. Gangguan Hubungan Singkat

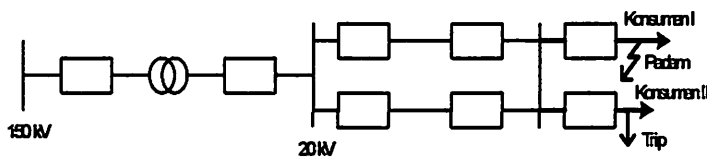
Saat terjadi hubungan singkat pada saluran instalasi, maka saluran yang terganggu harus dipadamkan, karena memang harus dipisahkan dari sistem yang sehat oleh rele proteksi. Untuk menjaga kontinuitas penyalaan pada konsumen, maka dibuat saluran ganda (*double circuit*), seperti pada Gambar 2.6, sehingga bila terjadi gangguan pada salah satu saluran, maka hanya saluran yang terganggu saja yang akan padam (putus), sedangkan saluran yang sehat akan tetap beroperasi. Pada kondisi ini, sistem yang sehat tidak akan mengalami pemadaman, hanya saja mengalami kedip tegangan selama selang waktu kerja rele proteksi dalam memisahkan bagian yang mengalami gangguan hubungan singkat.



Gambar 2.6.  
Gangguan hubung singkat menyebabkan tegangan kedip

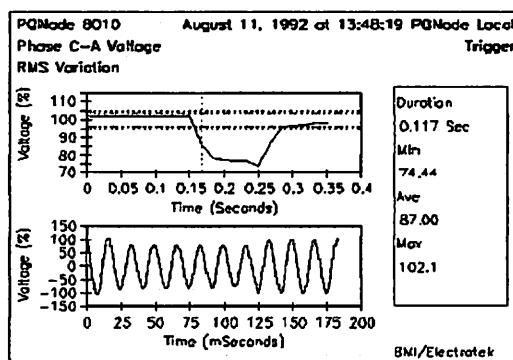


Untuk gangguan yang terjadi pada circuit yang berbeda dalam satu bus, yang telah dipisahkan melalui *circuit breaker* dengan menggunakan kontrol rele yang dilengkapi *directional relay* sehingga ketika terjadi gangguan pada salah satu circuit, maka circuit lainnya tidak akan putus (padam), hanya pada saat peralihan dari *double circuit* menjadi *single circuit* akan terasa dampaknya berupa kedip tegangan pada saluran yang tidak padam tersebut. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.7 .



Gambar 2.7.

Kondisi peralihan dari *double circuit* menjadi *single circuit* menyebabkan tegangan kedip.

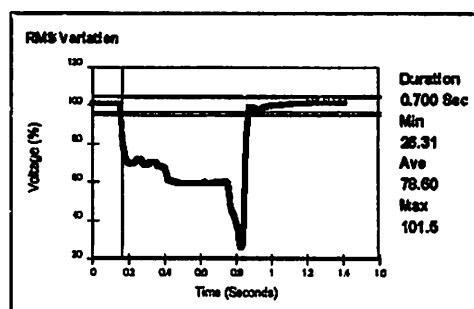


Gambar 2.8.

Bentuk gelombang tegangan kedip yang disebabkan oleh gangguan jarak jauh (7 Cycles)

Grafik penurunan tegangan akibat hubungan singkat dapat dilihat pada Gambar 2.9. Besar rms beban turun menjadi 70 % dari tegangan normal dalam waktu 0,117 detik. Pada Gambar 2.9 diketahui bahwa kedip tegangan mencapai 20 – 60 % dan terjadi selama 0.7 detik.

Salah satu sarana untuk menganalisa rangkaian fasa banyak tak seimbang adalah dengan menggunakan metode komponen simetri yang diperkenalkan oleh *C. L. Fortescue*.



Gambar 2.9.

Contoh grafik prosentase penurunan tegangan akibat hubungan singkat

Dia membuktikan bahwa sebuah sistem yang tidak seimbang dari  $n$  fasor yang berhubungan dapat diperlakukan menjadi  $n$  sistem fasor yang seimbang yang dapat disebut komponen simetri dari fasor asal. Berdasarkan fenomena *Fortescue*, tiga fasor tak seimbang dari sistem tiga fasa dapat diperoleh menjadi tiga sistem fasor yang seimbang, yaitu :

1. *Positive-sequence components*, terdiri dari tiga fasor yang sama magnitudenya, terpisah masing-masing sebesar  $120^\circ$  pada fase, dan mempunyai urutan fase yang sama seperti pada faktor asal.

2. *Negative-sequence components*, terdiri dari tiga fasor yang sama magnitudenya, terpisah masing-masing  $120^\circ$  pada fase, dan mempunyai urutan fase yang berlawanan dengan fasor asal.
3. *Zero-sequence components*, terdiri dari tiga fasor yang sama dalam magnitude dan mempunyai perbedaan fasa nol dari tiga fasa.

Biasanya dalam memecahkan persoalan dalam sistem tenaga dengan menggunakan komponen simetri ketiga fasa dinotasikan dengan  $a$ ,  $b$  dan  $c$  sehingga positif dari fasa adalah  $abc$  sedang urutan fasa dari komponen urutan negatif adalah  $acb$ . Gambar dari tiga sistem fasor yang seimbang dalam komponen simetri itu adalah seperti Gambar 2.10.

#### 2.4.2. Operator $a$

Dari Gambar 2.10 dibawah dapat dibuat persamaan sebagai berikut :

$$V_a = V_a^{(0)} + V_a^{(1)} + V_a^{(2)}$$

$$V_b = V_a^{(0)} + a^2 V_a^{(1)} + a V_a^{(2)}$$

$$V_c = V_a^{(0)} + a V_a^{(1)} + a^2 V_a^{(2)}$$

Dengan  $a$  merupakan operator yang bernilai  $1 \angle 120^\circ$ . Dalam bentuk matrik dinyatakan sebagai berikut :

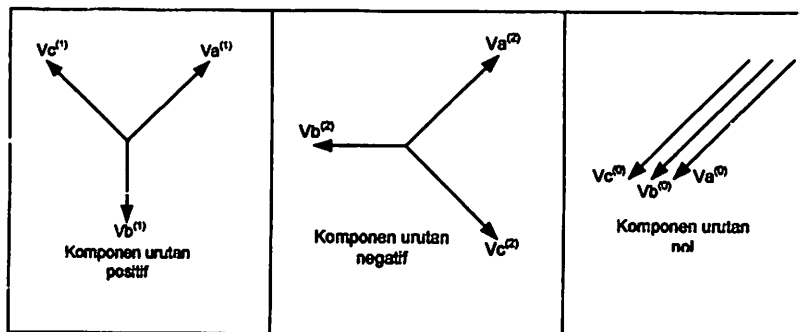
$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a^{(0)} \\ V_a^{(1)} \\ V_a^{(2)} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} V_a^{(0)} \\ V_a^{(1)} \\ V_a^{(2)} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(2.10)$$

dengan,

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

dan dapat diperoleh,

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.11)$$



Gambar 2.10.  
Tiga set fasor seimbang yang merupakan komponen simetri dari fasor yang tidak seimbang

### 2.4.3 Rangkaian Simetri Bintang dan Delta

Dalam sistem tiga fasa elemen dihubungkan antara *line a, b* dan *c* dalam konfigurasi bintang atau delta seperti pada Gambar 2.11.

$$I_a = I_{ab} - I_{ca}$$

$$I_b = I_{bc} - I_{ab}$$

$$I_c = I_{ca} - I_{bc}$$

Dari sini akan didapat hubungan dalam komponen simetri :

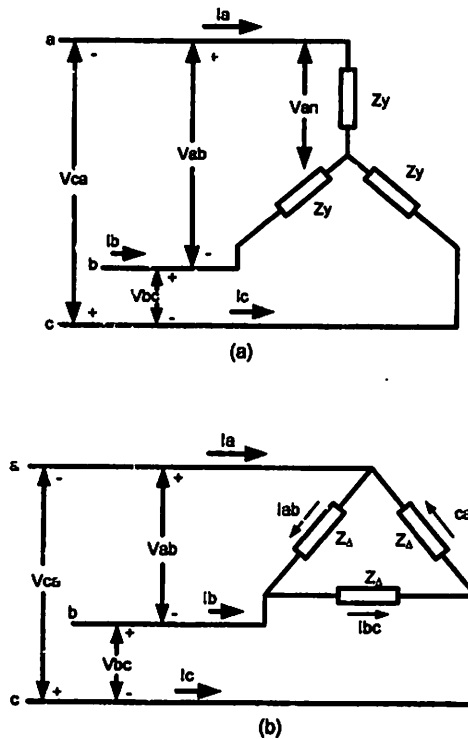
$$I_a^{(1)} = \sqrt{3} \angle -30^\circ \times I_{ab}^{(1)}$$

$$I_a^{(2)} = \sqrt{3} \angle 30^\circ \times I_{ab}^{(2)}$$

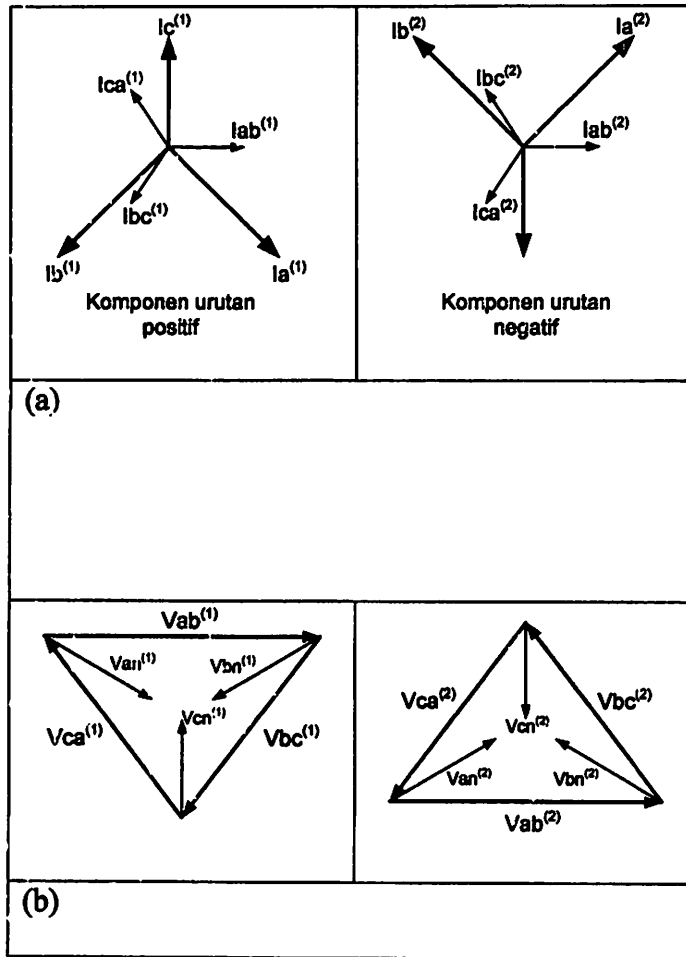
Dengan cara yang sama untuk tegangan dapat diperoleh :

$$V_{ab}^{(1)} = \sqrt{3} \angle 30^\circ \times V_{an}^{(1)} \text{ diturunkan menjadi } V_{ab}^{(2)} = \sqrt{3} \angle -30^\circ \times V_{an}^{(2)}$$

Hubungan fasor ini dapat dilihat pada Gambar 2.11 :



Gambar 2.11 Impedansi Simetris :  
 (a) Terhubung bintang (b) Terhubung delta



Gambar 2.12  
Komponen urutan positif dan negatif dari (a) Arus line dan line-line bintang, (b) Arus line-line dan line-netral delta

## 2.5 Jenis Gangguan Hubung Singkat

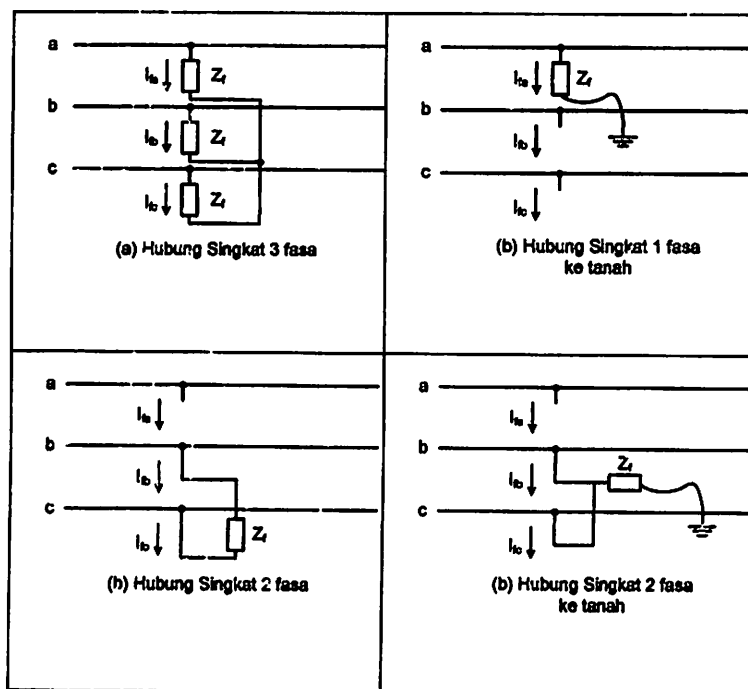
Gangguan-gangguan yang terjadi dalam sistem tenaga kebanyakan adalah gangguan tak simetri yang terdiri atas gangguan hubung singkat tak simetri, gangguan-gangguan tak simetri melalui impedansi dan konduktor terbuka.

Gangguan-gangguan pada sistem itu antara lain :

- Satu fasa ke tanah
- Dua fasa

- Dua fasa ke tanah
- Tiga fasa
- Tiga fasa ke tanah

Jenis-jenis gangguan tersebut dapat digambarkan sebagai berikut :

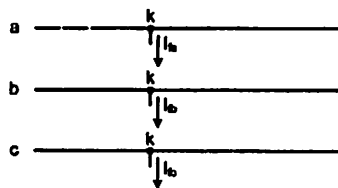


Gambar 2.13  
Jenis-jenis gangguan hubung singkat

Jalur dari arus gangguan fasa ke fasa atau fasa ke tanah dapat mengandung impedansi, karena gangguan tak simetri menyebabkan arus yang tak seimbang mengalir ke dalam sistem, maka metode komponen simetri sangat berguna dalam analisa untuk menentukan tegangan dan arus-arus di semua bagian dalam sistem setelah gangguan terjadi. Dengan teorema thevenin yang memungkinkan

mengganti sebuah keseluruhan sistem dengan sebuah generator dan sebuah impedansi dapat dicari arus gangguan.

Dalam perumusan untuk komponen simetri dari arus-arus dan tegangan, arus-arus yang mengalir keluar dari sistem dari fasa *a*, *b* dan *c* pada titik gangguan akan dinotasikan dengan  $I_{fa}$ ,  $I_{fb}$  dan  $I_{fc}$ , dapat dilihat pada Gambar 2.14 berikut :



Gambar 2.14  
Notasi pada titik gangguan

Cara yang digunakan akan menggunakan matrik impedansi bus dimana rangkaian positif, negatif dan nol pun dapat direpresentasikan dengan matrik impedansi bus. Dari matrik ini dapat dicari arus dan tegangan saat gangguan.

Matrik impedansi bus ini dalam bentuk sebagai berikut :

$$Z_{bus}^{(1)} = \begin{bmatrix} Z_{11}^{(1)} & Z_{12}^{(1)} & \dots & Z_{1n}^{(1)} \\ Z_{21}^{(1)} & Z_{22}^{(1)} & \dots & Z_{2n}^{(1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{n1}^{(1)} & Z_{n2}^{(1)} & \dots & Z_{nn}^{(1)} \end{bmatrix}$$

dengan cara yang sama matrik bus untuk rangkaian urutan negatif dan nol adalah sebagai berikut :

$$Z_{bus}^{(2)} = \begin{bmatrix} Z_{11}^{(2)} & Z_{12}^{(2)} & \dots & Z_{1n}^{(2)} \\ Z_{21}^{(2)} & Z_{22}^{(2)} & \dots & Z_{2n}^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{n1}^{(2)} & Z_{n2}^{(2)} & \dots & Z_{nn}^{(2)} \end{bmatrix}$$



$$Z_{bus}^{(0)} = \begin{bmatrix} Z_{11}^{(0)} & Z_{12}^{(0)} & \dots & Z_{1n}^{(0)} \\ Z_{21}^{(0)} & Z_{22}^{(0)} & \dots & Z_{2n}^{(0)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{r,1}^{(0)} & Z_{r,2}^{(0)} & \dots & Z_{r,m}^{(0)} \end{bmatrix}$$

Dimana  $Z_{ij}^{(1)}$ ,  $Z_{ij}^{(2)}$  dan  $Z_{ij}^{(0)}$  menotasikan elemen matrik impedansi bus untuk rangkaian positif, negatif dan nol.

### 2.5.1 Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

Gangguan satu fasa ke tanah adalah gangguan yang paling sering terjadi, yang disebabkan oleh petir atau kawat yang menyentuh tanah. Gambar diatas adalah gambar hubungan satu fasa ke tanah dengan melalui impedansi  $Z_f$ , dimana fasa  $a$  adalah fasa yang terhubung singkat. Kondisi pada titik gangguan  $k$  dinyatakan dengan persamaan berikut :

$I_{fb} = 0$	$I_{fc} = 0$	$V_{ka} = Z_f \cdot I_{fa}$
--------------	--------------	-----------------------------

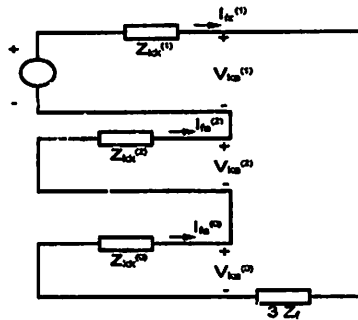
dengan  $I_{fb} = I_{fc} = 0$ , komponen simetri dari arus gangguan diberikan oleh :

$$\begin{bmatrix} I_{fa}^{(0)} \\ I_{fa}^{(1)} \\ I_{fa}^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{fa} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

dengan mengalikan matrik diatas maka,

$$I_{fa}^{(0)} = I_{fa}^{(1)} = I_{fa}^{(2)} = \frac{I_{fa}}{3} \dots\dots\dots(2.12)$$

Dari persamaan sebelumnya dapat diambil kesimpulan cara menghubungkan rangkaian urutan positif, negatif dan nol, yaitu seperti Gambar 2.15 berikut ini :



Gambar 2.15  
Hubungan Rangkaian Urutan Satu Fasa ke Tanah

Dari Gambar 2.15 diatas dapat dicari perumusan untuk mencari arus hubung singkat yaitu :

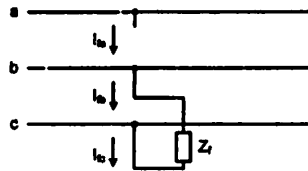
$$I_{fa}^{(0)} = I_{fa}^{(1)} = I_{fa}^{(2)} = \frac{V_f}{Z_{kk}^{(1)} + Z_{kk}^{(2)} + Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f} \dots\dots\dots(2.13)$$

Dimana  $V_f$  adalah tegangan sebelum gangguan pada bus yang mengalami gangguan. Sedangkan  $Z_{kk}^{(1)}$ ,  $Z_{kk}^{(2)}$  dan  $Z_{kk}^{(0)}$  adalah impedansi thevenin dari bus yang mengalami gangguan yaitu elemen diagonal matriks impedansi bus dari bus yang mengalami gangguan.

Karena  $I_{fa}^{(0)} = I_{fa}^{(1)} = I_{fa}^{(2)} = I_{fa} / 3$ , maka  $I_{fa} = 3 I_{fa}^{(0)}$

## 2.5.2 Hubung Singkat Fasa ke Fasa

Untuk menggambarkan gangguan hubung singkat fasa ke fasa melalui impedansi  $Z_f$  fasa  $b$  dan  $c$  dihubungkan melalui impedansi seperti Gambar 2.16.  $K$  adalah titik gangguan, dan gangguan hubung singkat yang terjadi pada fasa  $b$  dan  $c$ .



Gambar 2.16.  
Hubung Singkat dua Fasa

Dari Gambar 2.16 di atas dapat diambil persamaan berikut :

$I_{fa} = 0$	$I_{fb} = -I_{fc}$	$V_{kb} - V_{kc} = I_{fc} \cdot Z_f$
--------------	--------------------	--------------------------------------

Karena,

$I_{fa} = 0$	$I_{fb} = -I_{fc}$
--------------	--------------------

Maka komponen simetri dari arus gangguan adalah :

$$\begin{bmatrix} I_{fa}^{(0)} \\ I_{fa}^{(1)} \\ I_{fa}^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ I_{fb} \\ -I_{fb} \end{bmatrix}$$

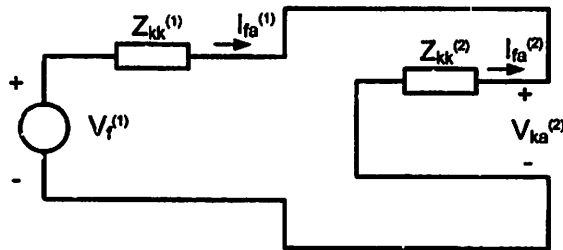
Dengan mengalikan matriks di atas maka didapatkan hubungan :

$$I_{fa}^{(0)} = 0$$

$$I_{fa}^{(1)} = -I_{fa}^{(2)}$$

Arus rangkaian urutan nol adalah nol karena  $I_{fa}^{(0)} = 0$ , arus urutan nol tidak masuk kedalam jaringan karena gangguan. Maka dari itu rangkaian urutan nol dalam analisa gangguan fasa ke fasa tidak melibatkan rangkaian urutan nol.

Untuk memenuhi persamaan  $I_{fa}^{(1)} = -I_{fa}^{(2)}$  maka rangkaian thevenin urutan positif dan negatif dihubungkan secara pararel seperti ditunjukkan Gambar 2.17 berikut :



Gambar 2.17.  
Hubungan Rangkaian Urutan Dua Fasa

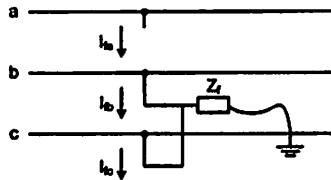
Gambar 2.17 diatas menunjukkan rangkaian urutan nol dari sistem tidak dimasukkan dlm perhitungan gangguan fasa ke fasa ini. Dari Gambar 2.17 dapat ditunjukkan langsung persamaan untuk mencari arus urutan positif dari arus gangguan, yaitu :

$$I_{fa}^{(1)} = -I_{fa}^{(2)} = \frac{V_f}{Z_{kk}^{(1)} + Z_{kk}^{(2)} + Z_f} \dots\dots\dots(2.14)$$

Setelah arus  $I_{fa}^{(1)}$  dan  $I_{fa}^{(2)}$  diketahui, maka dapat dicari arus gangguan.

### 2.5.3 Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah

Untuk hubung singkat dua fasa ke tanah, maka keadaan pada titik gangguan digambarkan pada Gambar 2.18, dan gangguan kerja pada fasa *b* dan *c*.



Gambar 2.18  
Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah

Persamaan pada titik gangguan adalah sebagai berikut :

$I_{fa} = 0$	$V_{kb} = V_{kc} = (I_{fa} + I_{fc}) Z_f$
--------------	---

Karena  $I_{fa}$  sama dengan nol, maka arus urutan nol adalah,

$$I_{fa}^{(0)} = \frac{(I_{fb} + I_{fc})}{3}$$

dan persamaan tegangan diatas menjadi,

$$V_{kb} = V_{kc} = 3 Z_f \cdot I_{fa}^{(0)}$$

Dengan mensubstitusikan  $V_{kb}$  kepada  $V_{kc}$  maka dengan transformasi komponen simetri,

$$\begin{bmatrix} V_{ka}^{(0)} \\ V_{ka}^{(1)} \\ V_{ka}^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ka} \\ V_{kb} \\ V_{kb} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.15)$$

Baris kedua dan ketiga dari persamaan 2.15 menunjukkan bahwa :

$$V_{kb}^{(1)} = V_{kb}^{(2)}$$

Sementara baris pertama menunjukkan,

$$3V_{ka}^{(0)} = V_{ka} + 2V_{kb} = (V_{ka}^{(0)} + V_{ka}^{(1)} + V_{ka}^{(2)}) + 2(3Z_f I_{fa}^{(0)})$$

Dengan mengumpulkan bentuk urutan nol pada satu sisi dan mengganti

$V_{ka}^{(2)} = V_{ka}^{(1)}$  dan mencari  $V_{ka}^{(1)}$  didapat,

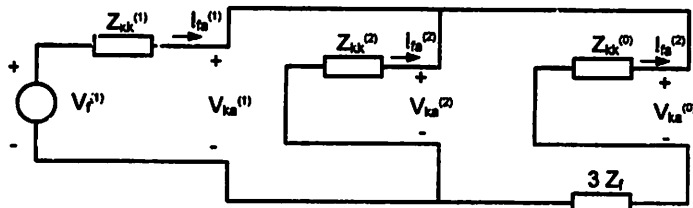
$$V_{ka}^{(1)} = V_{ka}^{(2)} - 3Z_f \cdot I_{fa}^{(0)}$$

Dengan memperhatikan  $I_{fa}^{(0)} = 0$  maka,

$$V_{ka}^{(1)} = V_{ka}^{(2)} = V_{ka}^{(0)} - 3Z_f \cdot I_{fa}^{(0)}$$

$$I_{fa}^{(0)} = I_{fa}^{(1)} = I_{fa}^{(2)} = 0$$

Karakteristik persamaan gangguan dua fasa ke tanah di atas terpenuhi bila ketiga rangkaian dihubungkan secara paralel seperti ditunjukkan pada Gambar 2.19 di bawah ini :



Gambar 2.19  
Rangkaian Urutan 2 Fasa ke Tanah

Gambar 2.19 menunjukkan bahwa arus gangguan urutan positif diperoleh dengan mengaplikasikan tegangan sebelum gangguan  $V_f$  terhadap impedansi total yang terdiri dari impedansi urutan positif  $Z_{kk}^{(1)}$  seri dengan kombinasi dari  $Z_{kk}^{(2)}$  dan  $(Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f)$  yaitu :

$$I_{fa}^{(1)} = \frac{V_f}{Z_{kk}^{(1)} + \left[ \frac{Z_{kk}^{(2)} (Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f)}{Z_{kk}^{(2)} + Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f} \right]} \dots\dots\dots(2.16)$$

Arus gangguan urutan negatif dan nol dari sistem dapat ditentukan dari Gambar 2.19 dengan menggunakan pembagian arus yang sederhana sehingga,

$$I_{fa}^{(0)} = -I_{fa}^{(1)} \frac{Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f}{Z_{kk}^{(2)} + Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f} \dots\dots\dots(2.17)$$

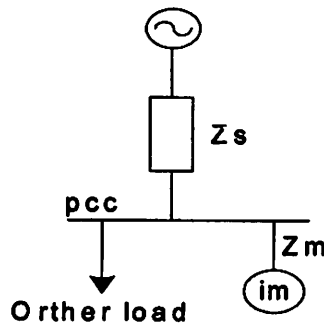
$$I_{fa}^{(2)} = -I_{fa}^{(1)} \frac{Z_{kk}^{(2)}}{Z_{kk}^{(2)} + 2Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f} \dots\dots\dots(2.18)$$

Dari persamaan-persamaan 2.16, 2.17, 2.18 bila  $Z_f = \infty$  maka rangkaian urutan nol akan menjadi open circuit dan takkan ada arus urutan nol yang mengalir maka persamaan akan kembali kepada persamaan gangguan fasa ke fasa.

Pada kasus starting motor induksi, tegangan kedip terjadi karena arus starting motor induksi dapat mencapai 5-6 kali arus normal motor. Sebagai contoh, motor dengan kapasitas daya 1 hp membutuhkan kira-kira 1 kVA pada operasi normalnya, maka kVA yang dibutuhkan pada saat startingnya 5 sampai dengan 7 kVA. Seandainya kapasitas motor 5% dari kapasitas trafo pada penyulang, maka kVA yang diserap oleh motor ketika start akan mencapai 25% sampai 35% dari rating trafo. Drop tegangan sebesar ini sudah berpengaruh pada

nyala lampu, sehingga sering sekali kedip tegangan yang secara visual dapat disaksikan dari kedip nyala lampu tersebut dan akan sangat mengganggu pandangan mata. Durasi dari kedip tegangan yang disebabkan oleh starting motor tergantung pada parameter dari motor tersebut.

Dari Gambar 2.20 kedip tegangan akibat starting motor induksi dinyatakan dengan persamaan dibawah ini:



Gambar 2.20 Rangkaian ekivalen kedip tegangan akibat starting motor

$$V_{sag} = \frac{Z_M}{Z_S + Z_M} \dots\dots\dots(2.19)$$

Dengan  $Z_S$  = impedansi sumber

$$=Z_S = \frac{Vn^2}{S_{source}} \dots\dots\dots(2.20)$$

$Z_M$  = impedansi motor saat starting



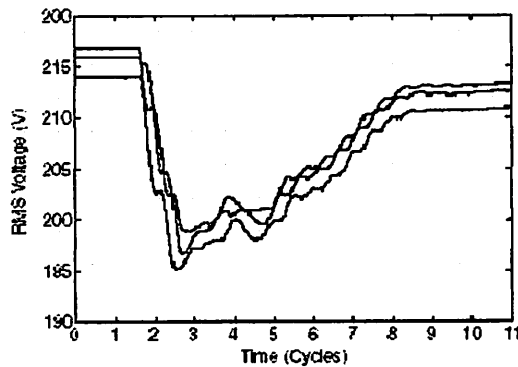
$$= Z_M = \frac{Vn^2}{\beta S_{source}} \dots\dots\dots(2.21)$$

$\beta$  = ratio antara arus starting dan arus nominal

Jadi persamaan 2.19 dinyatakan sebagai:

$$V_{sag} = \frac{S_{source}}{S_{source} + \beta S_{source}} \dots\dots\dots(2.22)$$

Grafik tegangan kedip karena starting motor induksi dapat dilihat pada Gambar 2.21.



Gambar 2.21  
Tegangan kedip akibat starting motor induksi

### 2.6. Estimasi Karakteristik Gangguan

Secara kualitatif, tegangan kedip tidak dapat diramalkan kapan terjadinya, sehingga kita tidak dapat menghindarinya, hanya saja kita dapat mengantisipasi terjadinya tegangan kedip ini.

Secara kuantitatif, karakteristik gangguan ditentukan oleh beberapa parameter, antara lain variasi amplitude tegangan dan perubahan bentuk gelombang.

### **2.6.1. Variasi Amplitudo dan Durasi**

Dalam pembahasan tentang penyebab terjadinya fenomena tegangan kedip telah disinggung bahwa salah satu penyebabnya adalah akibat reaksi transient sistem terhadap manuver jaringan/beban maupun sebagai akibat berkerjanya peralatan pengaman (*auto recloser*). Karena adanya indikasi adanya gangguan oleh petir, pohon, dll, yang terjadi di saluran transmisi maupun distribusi.

Secara garis besar dapat diperoleh hal yang mendasar yang bisa dijadikan catatan:

- a. Dengan mengabaikan selang waktunya, maka 60-70% gangguan tegangan kedip yang terjadi besarnya (amplitude) tidak melebihi 25% dari tegangan nominalnya.
- b. Dengan mengabaikan besar (amplitudo) maka 70-80% dari gangguan tegangan kedip yang terjadi pada SUTM/SKTM berlangsung dalam selang waktu tidak lebih dari 320 ms.
- c. Sekitar 60% dari tegangan kedip besarnya tidak lebih dari 25% dan lamanya kurang dari 320 ms.

### 2.6.2. Pergeseran Fasa (*Phase Jump*)

Penyebab utama pergeseran fasa pada saat sebelum dan selama terjadinya tegangan kedip antara lain adalah akibat perbedaan rasio  $X/R$  dari sumber dan saluran yang mengalami gangguan dan propagasi gangguan tegangan kedip yang disebabkan oleh hubung singkat satu fasa ke tanah.

Tegangan kedip diakibatkan arus hubung singkat yang mengalir ke gangguan. Magnitude dan fasa tegangan  $\underline{U}_{sag}$  saat gangguan pada PCC (Point of Common Coupling), ditentukan oleh impedansi sumber dan impedansi gangguan.

Arus gangguan pada suatu tempat di grid dapat mengakibatkan berkurangnya magnitude, dan pada beberapa kasus mengakibatkan lompatan fasa tegangan pada PCC.  $\underline{U}_{sag}$  adalah tegangan saat sag dan  $\alpha$  adalah loncatan fasa pada PCC. DVR menginjeksikan tegangan terhubung seri dengan supply untuk kompensasi tegangan kedip.

Dua metode dites, yang dapat melindungi pergeseran fasa beban sensitive dari lompatan fasa. Keduanya adalah :

- *In-phase Compensation* dengan kompensasi lompatan fasa yang halus
- *Pre-sag Compensation*

Metode pertama secara terus menerus memantau tegangan supply dan digunakan juga informasi tentang kondisi *pre-sag*, tetapi kondisi tersebut berubah perlahan-lahan untuk menginjeksikan suatu tegangan pada fasa dengan tegangan

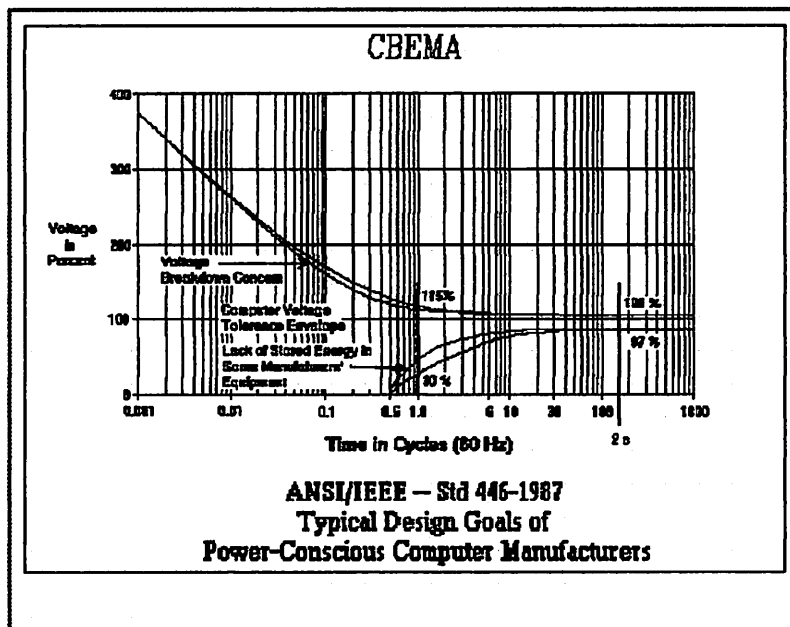
supply yang baru. Metode kedua menggunakan kondisi *pre-sag* dan pada kasus yang ideal tegangan beban tak terganggu tegangan kedip.

Pergeseran fasa ini akan sangat berpengaruh terhadap kerja peralatan industri yang menggunakan komponen elektronika daya. Umumnya pengontrolan waktu penyalaan (sudut penyalaan  $\alpha$ ). Thyristor menggunakan “*Zero Crossing Detector*” dari tegangan suplainya sebagai referensi, sehingga bila terjadi pergeseran fasa akan terjadi error pada pengoperasian peralatan industri.

### **2.6.3. Ketidak Seimbangan Tegangan Sistem**

Selain berpengaruh terhadap amplitudo tegangan dan durasi, serta pergeseran fasa, maka tegangan kedip juga mempengaruhi factor ketidakseimbangan tegangan dan akan terjadi perubahan bentuk gelombang.

Tegangan kedip yang paling sering terjadi adalah yang diakibatkan oleh terjadinya gangguan satu fasa ke tanah, dimana salah satu fasanya adalah nol, akibatnya akan terjadi ketidakseimbangan tegangan sistem, sedangkan gangguan dua atau tiga fasa relative jarang terjadi. Pengaruhnya terhadap tegangan di bus konsumen tergantung pada jarak dan level tegangan,serta lamanya tergantung dari *setting relay* dan jenis pengaman yang digunakan.



Gambar 2.22 Kurva CBEMA

## 2.7. Sensitifitas Dan Karakteristik Peralatan Industri

Standar sensitifitas peralatan adalah kurva CBEMA (*Computer Business Manufacturers Association*). Kurva tersebut menunjukkan sensitifitas beban sangat tergantung pada durasi dari tegangan kedip. Tegangan kedip yang diperbolehkan berkisar antara 0% (0.5 cycle) – 87 % tegangan (30 cycles)

Secara umum, penjelasan karakteristik peralatan industri yang sensitif terhadap tegangan kedip adalah sebagai berikut :

### 2.7.1. Motor Listrik

Gangguan tegangan kedip yang terjadi langsung pada terminal motor, dapat menyebabkan terhentinya operasi motor tersebut. Pemutusan tegangan suplai motor sinkron ataupun motor induksi, melalui pembukaan kontaktor selama selang waktu yang singkat, tidak langsung membuat tegangan terminal jadi nol.

Amplitudo dan fasa dari tegangan sisa pada motor tersebut bervariasi selama selang waktu pemutusan.

Bila kemudian kontaktor dimasukkan kembali saat tegangan suplai telah normal kembali, akan terjadi arus lebih, dimana karakteristiknya tergantung pada beda fasa dan beda amplitudo antara tegangan jaringan dengan tegangan sisa pada terminal motor.

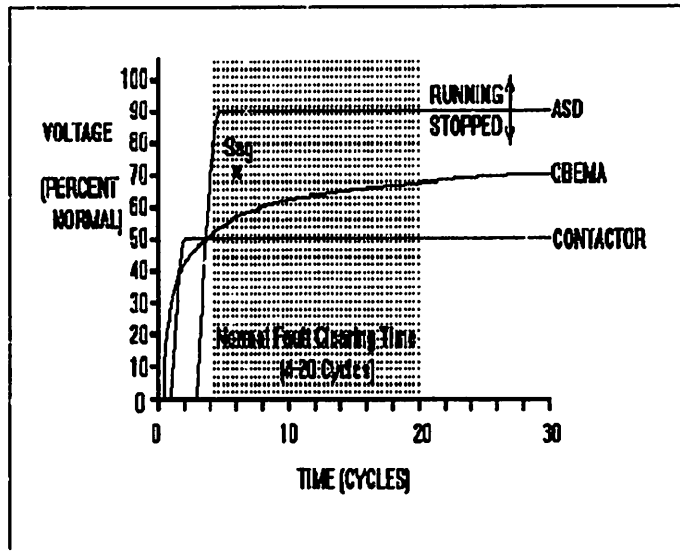
**a. Motor Sinkron.**

Sudut antara sumbu medan putar stator dan rotor akan membesar bila:

1. Pada tegangan konstan terjadi kenaikan torsi beban.
2. Pada torsi beban konstan terjadi penurunan dari tegangan suplai ke motor.
3. Bila terjadi variasi amplitudo tegangan maka sudut elektrik akan melebihi  $90^\circ$  dan mengakibatkan motor kehilangan sinkronisasi.

**b. Motor Induksi**

Motor induksi mewakili beban yang umum dipakai pada sistem tenaga industri. Faktor utama penyebab gangguan adalah faktor keseimbangan torsi. Bila terjadi tegangan kedip maka torsi motor akan turun sehingga akan terjadi perlambatan motor dan beban. Saat kondisi normal kembali, torsi motor akan berubah secara tiba-tiba, akibatnya motor tidak dapat melakukan akselerasi untuk mencapai kecepatan nominalnya lagi.



Gambar 2.23  
Tingkat sensitifitas peralatan terhadap tegangan kedip

Disisi lain jaringan distribusi/transmisi dan motor dipisahkan oleh impedansi (saluran dan trafo), sehingga pada saat tegangan suplai kembali normal, arus lebih yang terjadi pada motor dapat menyebabkan drop tegangan pada impedansi tersebut, sehingga motor tidak mungkin kembali pada kecepatan nominal, karena nilai torsi motor menjadi lebih kecil daripada nilainya yang sesuai dengan name platenya.

### 2.7.2. Kontaktor

Kontaktor, umumnya dapat mentolerir tegangan kedip sampai 50% tegangan pada *name plate*, selama beberapa cycle, bila lebih dari *setting* yang ditetapkan maka sirkuit kontrol akan memerintahkan kontaktor untuk trip. Salah satu manufaktur menyediakan data yang menerangkan kontaktor motor akan terbuka (drop out) ketika tegangan kedip 75% tegangan normal jika kondisi tersebut

berlangsung lebih dari 1 cycle. Dan beberapa kontaktor akan terbuka saat terjadi tegangan kedip lebih dari atau sama dengan 70 % dari tegangan normal.

### **2.7.3. Peralatan Kontrol dan Variable Speed Drive**

Motor listrik sebagai penggerak utama dalam proses industri, bias anya dilengkapi dengan peralatan kontrol tambahan, antara lain:

- a. Peralatan manuver (kontaktor dan pemutus)
- b. Sistem pendingin/ventilasi (motor dan kontaktor)
- c. Peralatan proteksi
- d. Sistem starting
- e. Sistem eksitasi

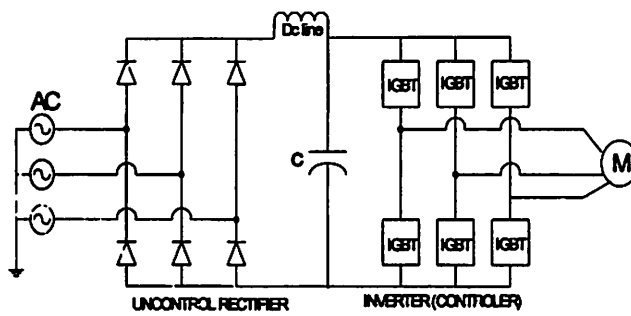
Peralatan kontrol tersebut umumnya menggunakan prinsip elektronika daya, sehingga jika tidak berhati-hati dalam melakukan setting dengan baik maka kemungkinan besar akan terjadi trip yang tidak diinginkan. Beberapa drives (penggerak) didesain untuk tetap bekerja saat tegangan kedip. Waktu kerjanya antara 0.05 -- 0.5 detik. Hal ini tergantung pada pembuat dan model. Beberapa model dari salah satu pembuat memonitor tegangan jala jala dan trip setelah tegangan kedip 90% dari tegangan normal yang dideteksi selama 50 ms.

### **2.7.4. AC Drive**

Struktur umum dari AC-PWM (*Pulse Width Modulation*) driver umumnya terdiri dari rangkaian penyearah 6 dioda (*3 phasa rectifier bridge*), kapasitor DC link yang berfungsi untuk menjamin konversi tegangan suplai AC menjadi DC tegangan ripple yang rendah. Disamping itu, kapasitor DC-link ini dapat membantu mempertahankan kerja motor terhadap pengaruh gangguan tegangan



kedip. Melalui rangkaian inverter yang dilengkapi skema kontrol PWM, tegangan DC tersebut dikonversikan kembali menjadi tegangan AC dengan frekuensi dan amplitudo tegangan yang variabel, untuk mensuplay beban (motor induksi tiga fasa). Penggunaan dioda menguntungkan karena tidak memerlukan rangkaian penyalan sehingga dampak tegangan kedip yang berupa pergeseran fasa dapat diabaikan.



Gambar 2.24  
Topologi AC motor drive

Tegangan kedip pada *AC drive* terjadi akibat adanya ketidak seimbangan tegangan sesaat yang disebabkan oleh gangguan tersebut. Fenomena ini dapat mengakibatkan mal operasi pada AC drive maupun berkerjanya peralatan proteksi.

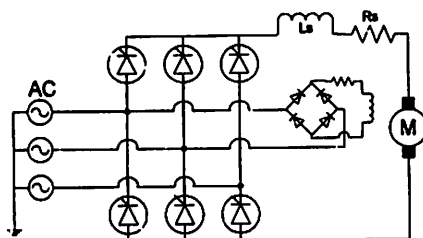
Pada saat terjadi ketidakseimbangan tegangan sebagai pengaruh dari terjadinya gangguan tegangan kedip akibat adanya hubungan singkat satu fasa ke tanah, arus saluran pada salah satu fasanya dapat mencapai 200% dari nominalnya, dan arus tertinggi yang mengalir melalui *bridge rectifier* dapat mencapai 4 kali pada kondisi normalnya.

Lonjakan arus ini dikarenakan saat tegangan kapasitor pada bus DC melebihi tegangan inputnya, maka tidak akan ada aliran arus. Akibatnya, kapasitor dituntut untuk *discharge* dalam jumlah yang lebih banyak dari pada operasi normal, untuk menjamin berlangsungnya aliran energi ke motor. Dengan demikian, bila tegangan kembali normal dan jembatan penyearah kembali berfungsi untuk mensuplai energi termasuk untuk *recharging* kapasitor, maka terjadi aliran arus yang cukup besar. Bila sebelumnya sudah terjadi pergeseran sudut fasa, maka setiap pergeseran tersebut dapat menyebabkan terjadinya perpindahan fasa dari posisi aliran arus.

Umumnya AC drive akan trip bila terjadi “*under voltage*” yaitu saat nilai penurunan tegangan kapasitor pada bus DC telah melampaui limit tertentu, atau bila terjadi “*over current*” saat dibutuhkan input yang melebihi batas tertentu.

### 2.7.5. DC Drive

Karakteristic *DC Drive* sangat berbeda dengan *AC Drive*, antara lain karena struktur topologinya yang lebih sederhana dan juga tidak tersedianya mekanisme penyimpanan energi tambahan kecuali *inersia* motor itu sendiri.



Gambar 2.25  
Topologi DC Motor drive

Pada Gambar 2.25 di atas, sumber AC dihubungkan dengan armature motor DC melalui jembatan penyearah SCR dengan tujuan untuk mendapatkan sistem suplai DC variabel yang diperlukan motor DC. Saat operasi normal, Thyristor akan mulai ON dalam urutan setiap  $1/6$  siklus, yang ditentukan oleh sudut fasa sumber AC dan masing-masing akan konduksi selama  $2/6$  siklus. Kontrol pemacu dari SCR dilakukan untuk mengatur bentuk gelombang tegangan suplai sehingga didapat harga rata-rata tegangan output yang diinginkan.

Pengontrolan sudut penyalan tersebut dilakukan melalui looping dari sistem umpan balik (*feedback looping*) dari tegangan maupun kecepatan yang biasanya telah dilengkapi dengan "*timing circuitry*" dan "*phase-lock loop*" (PLL) sebagai stabilisator dari "*timing circuit*" tersebut, sehingga dapat dijamin tercapainya sinkronisasi titik nol dari masing-masing tegangan suplai.

Monitoring harga rms gelombang input, umumnya dilakukan melalui rangkaian detektor harga puncak, oleh karenanya drive akan langsung trip pada saat merasakan adanya *undervoltage, overvoltage, phase lose* dan arus yang berlebih, baik pada input maupun pada outputnya. Umumnya rangkaian detektor harga puncak inilah yang menyebabkan terjadinya trip (walaupun sebenarnya trip tersebut tidak perlu terjadi).

Bila terjadi gangguan tegangan kedip disisi AC, maka tegangan disisi DC yang merupakan supli tegangan ke motor DC akan turun dan mengakibatkan terjadi penurunan kecepatan. Dalam kondisi ini, sistem pengaturan akan mendeteksi adanya penurunan kecepatan (ataupun tegangan DC) dan memberikan

instruksi guna menaikkan sudut konduksi *Thyristor* agar terjadi penambahan arus ( yang melalui stator).

Penurunan kecepatan putar menyebabkan turunnya *force electromotive*, akibatnya pada saat tegangan kembali normal, timbul arus yang kemudian yang menyebabkan berkerjanya sistem proteksi yang melindungi keseluruhan sistem, sehingga untuk menghindari akibat tersebut, perlu ditambah pelengkap berupa alat deteksi kedip tegangan disisi AC dan efek penurunan tegangan disisi DC, sehingga intruksi untuk mengurangi sudut konduksi pada masing-masing *Thyristor* dapat langsung dilakukan untuk mencegah terjadinya arus lebih pada saat tegangan kembali normal.

Dilain pihak karakteristik gangguan tegangan kedip sulit diramalkan (sangat tidak menentu, baik diskontinuitas, maupun ketidakseimbangan tegangan yang ditimbulkan), sehingga dapat menyebabkan kerusakan pada "*timing circuitry*" tersebut, sehingga terjadi kehilangan sinkronisasi antara drive dan tegangan suplai. Dalam mengantisipasi kondisi tersebut, dan mencegah terjadinya arus lebih, beberapa jenis drive akan menonaktifkan pemacu *Thyristor* selama adanya gangguan.

Bila terjadi pergeseran fasa akibat gangguan tegangan kedip maka detektor *phasa lose* langsung berkerja untuk mentrip drive. Kasus yang paling ekstrim adalah apabila detektor urutan fasa merasakan adanya pembalikan urutan fasa disisi suplai, akibatnya terjadinya kesalahan urutan penyalaan pada *Thyristor* sehingga terjadi arus lebih.

### **2.7.6 Programmable Logic Controllers**

PLC adalah komponen yang penting bagi proses industri yang mengontrol keseluruhan proses. Input dan output unit akan trip untuk tegangan paling tinggi 90% untuk beberapa cycle. Tingkat sensitifitas dari peralatan tipe tersebut ditunjukkan dengan durasi gangguan selama tegangan kedip juga terindikasi. Hal ini penting untuk mengenali keseluruhan proses pada rancangan industri dapat tergantung pada sensitifitas satu peralatan. Proses keseluruhan termasuk kontrol, penggerak, kontaktor, robot dan sebagainya yang mempengaruhi proses industri. Sulit untuk diidentifikasi bagian mana yang sensitif dari peralatan ketika keseluruhan proses berhenti.

### **2.8. Teknologi Pemulihan Tegangan Kedip**

Masalah tegangan kedip menjadi semakin menjadi perhatian konsumen industri yang mengoperasikan peralatan yang bersifat *flicker-sensitif*. Terhentinya operasi peralatan akibat fluktuasi tegangan dapat mengakibatkan kerugian yang besar pada kegiatan bisnis konsumen.

Perkembangan teknologi *solid state* untuk aplikasi dibidang tenaga listrikan memungkinkan solusi teknis dalam mengatasi tegangan kedip. Beberapa pabrikan peralatan listrik terkemuka di dunia, seperti ABE, Westinghouse, General Electric, Siemens, dll telah sejak lama memasarkan suatu alat yang mampu mengatasi masalah tegangan kedip. Sistem tersebut berbasiskan *solid state dc/ac switching inverter* yang fungsi utamanya adalah menginjek tegangan secara seri terhadap tegangan pasokan dengan tujuan menaikkan tegangan sumber ketika terjadi tegangan kedip. Setiap fabrikasi menamai berbeda atas sistem

tersebut, namun bila ditinjau fungsi sistem tersebut dapat disebut sebagai pemulih tegangan dinamik (*Dynamic Voltage Restorer*).

## **2.9. Inverter**

### **2.9.1. Definisi Inverter**

Konverter DC to AC secara umum lebih dikenal dengan nama inverter, memiliki fungsi mengubah tegangan input dc menjadi tegangan output ac dengan besar magnitudo dan frekuensi yang diinginkan. Tegangan output bisa dibuat tetap atau variabel pada frekuensi tetap atau frekuensi yang bisa diubah. Besarnya output tegangan yang diinginkan dapat dicapai dengan 2 cara yaitu cara pertama dengan merubah besarnya tegangan input dc sedangkan gain dari inverter dijaga konstan, dan cara kedua adalah jika tegangan input dc tetap, gain dari inverter yang diubah-ubah. *Inverter gain* didefinisikan sebagai rasio antara tegangan output ac dengan tegangan input dc. Untuk inverter yang ideal bentuk sinyal outputnya berupa *sinusoidal*. Namun pada praktiknya, output dari inverter berbentuk *nonsinusoidal* dan mengandung harmonisa.

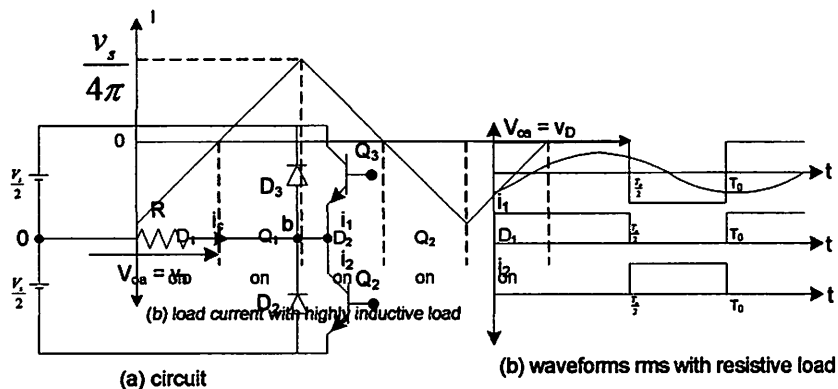
Secara umum inverter dibagi menjadi dua bagian yaitu: inverter satu fasa dan inverter tiga fasa. Peralatan elektronika daya yang dipakai untuk inverter, antara lain: *bipolar junction transistors* (BJT<sub>s</sub>), *metal oxide semiconductor field-effect transistors* (MOSFET), *insulated-gate bipolar transistor* (IGBT), *metal oxide semiconductor-controlled thyristors* (MCT<sub>s</sub>), *static induction transistors* (SIT<sub>s</sub>), *gate-turn-off thyristors* (GTO<sub>s</sub>). Pemakaian peralatan tersebut dipilih didasarkan pada jenis penerapannya. Inverter biasanya memakai sinyal kontrol PWM untuk menghasilkan tegangan output ac.

Inverter dikatakan sumber tegangan (*Voltage fed Inverter*) jika tegangan inputnya dibuat konstan dan dikatakan sumber arus (*Current Fed Inverter*) jika arus inputnya dijaga konstan. Jika tegangan inputnya merupakan tegangan terkendali atau tegangan inputnya merupakan tegangan yang bisa diatur, maka inverter ini bisa disebut *variable dc linked inverter*.

## 2.9.2 Prinsip Dasar

### 2.9.2.1. Single Phase Half Bridge Inverter

Prinsip dasar dari inverter satu fasa bisa dijelaskan dengan Gambar 2.28. rangkaian inverter terdiri dari dua chopper. Ketika transistor  $Q_1$  saja yang dihidupkan dengan waktu  $T/2$ , tegangan sesaat yang melalui beban  $v_o$  adalah  $V/2$ . Jika transistor  $Q_2$  saja yang dihidupkan untuk selang waktu  $T/2$ , maka tegangan bebannya menjadi  $-V/2$ . Dengan logika ini maka kedua transistor tidak dihidupkan pada waktu yang sama.



Gambar 2.26  
Single phase half bridge inverter

Gambar 2.28b. menunjukkan bentuk tegangan output inverter dan arus transistor dengan beban resistive. Inverter ini membutuhkan tiga kabel pada sumber dc-nya, sehingga ketika transistornya mati maka teganganbaliknya

sebesar  $V_s/2$ . Inverter ini dikenal sebagai *half bridge inverter*. Tegangan output rmsnya ditunjukkan pada persamaan:

$$V_o = \left[ \frac{2}{T_o} \int_0^{T_o/2} \frac{V_s^2}{4} dt \right]^{1/2} = \frac{V_s}{2} \dots\dots\dots(2.23)$$

Sedangkan tegangan output sesaatnya dapat dituliskan dalam deret fourier sebagai berikut:

$$v_o = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t) \dots\dots\dots(2.24)$$

Karena bentuk gelombang outputnya termasuk gelombang ganjil maka  $a_0$  dan  $a_n$  bernilai 0. sedangkan besarnya  $b_n$  adalah

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} v_o \sin(n\omega t) d(\omega t) = \frac{2V_s}{n\pi} \dots\dots\dots(2.25)$$

Sehingga tegangan output sesaat  $v_o$  dapat ditulis kembali menjadi:

$$v_o = \sum_{n=1,3,5..}^{\infty} \frac{2V_s}{n\pi} \sin(n\omega t) \dots\dots\dots(2.26)$$

**2.9.2.2. Single Phase Full Bridge Inverter**

*Single Phase full Bridge Inverter* ditunjukkan pada Gambar 2.29.a. Inverter ini terdiri atas empat chopper. Ketika transistor Q1 dan Q2 dihidupkan secara bersama, tegangan output  $V_s$  melalui beban. Jika transistor Q2 dan Q3 dihidupkan secara bersamaan, maka tegangan beban menjadi  $-V_s$ . Bentuk tegangan output ditunjukkan dalam Gambar 2.27b. Tegangan output rmsnya ditunjukkan pada persamaan :



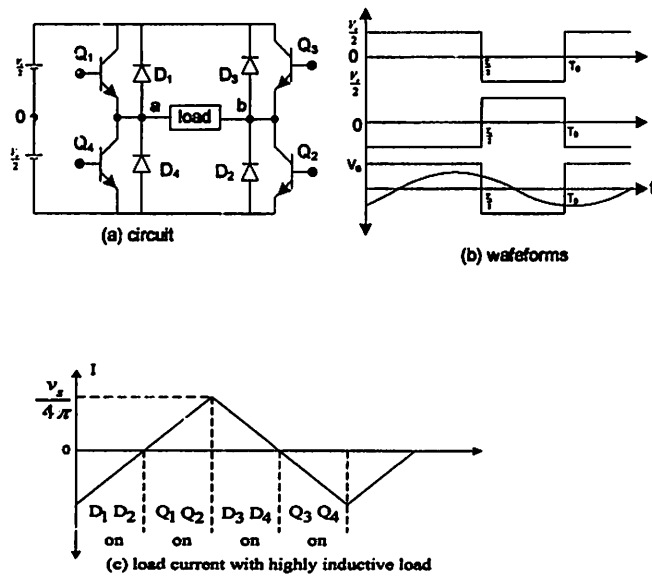
$$V_o = \left( \frac{2}{T_o} \int_0^{T_o/2} V_s^2 dt \right)^{1/2} = V_s \quad \dots\dots\dots(2.27)$$

Sedangkan tegangan output sesaatnya jika ditulis dalam deret fourier ditunjukkan pada persamaan

$$V_o = \sum_{n=1,2,3..}^{\infty} \frac{4V_s}{n\pi} \sin(n\omega t) \quad \dots\dots\dots (2.28)$$

Dan untuk  $n = 1$  maka nilai rms untuk tegangan dasar  $V_1$

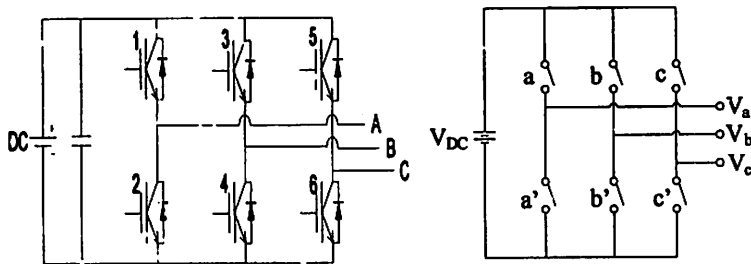
$$V_1 = \frac{4V_s}{\sqrt{2\pi}} = 0.9V_s \quad \dots\dots\dots (2.29)$$



Gambar 2.27  
Single phasa full bridge inverter

### 2.9.2.3 Three Phase Inverter

Inverter sumber tegangan 3 fasa adalah peralatan elektronik yang berfungsi untuk mengubah tegangan searah (DC) menjadi tegangan bolak-balik (AC) 3 fasa. Pada umumnya inverter 3 fasa bekerja dengan prinsip *switched mode* yang rangkaian dasarnya seperti terlihat pada Gambar 2.30. Saklar-saklar pada gambar tersebut bekerja sedemikian rupa, sehingga bentuk tegangan keluaran (A, B, & C) membentuk tegangan 3 fasa.



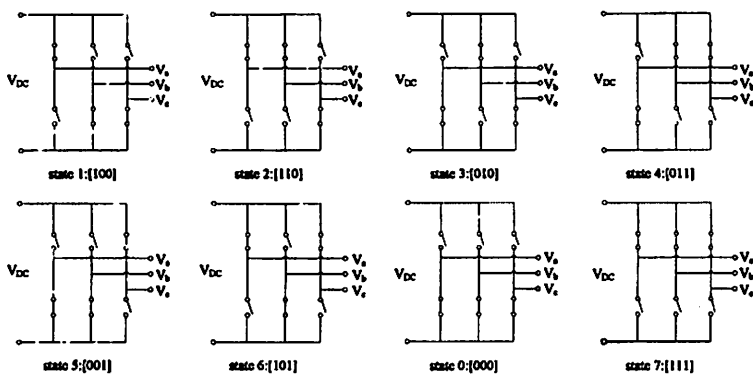
Gambar 2.28

- (a). Rangkaian inverter tiga fasa dengan IGBT
- (b). Inverter Tiga Fase dengan prinsip Switched-Mode

Kedudukan saklar-saklar yang berpasangan (a dan a', b dan b', c dan c') diatur sedemikian hingga setiap pasang tidak pernah bersama-sama ON ataupun sama-sama OFF. Artinya jika saklar a dalam keadaan ON, maka saklar a' berada dalam keadaan OFF atau sebaliknya. Demikian pula untuk pasangan b - b' dan c - c'. Ada 8 kombinasi kedudukan ON-OFF dari saklar-saklar tersebut, yang ditunjukkan pada Gambar 2.28. Untuk selanjutnya jika saklar a dalam keadaan ON (atau saklar a' dalam keadaan OFF) , maka dinyatakan dengan  $a = 1$  atau  $a' = 0$ . Kombinasi saklar disebut sebagai state. State-1

menyatakan kedudukan saklar-saklar dengan kombinasi a, b dan c sebagai [1 0 0] dan state-2. menyatakan kombinasi [1 1 0]. Demikian untuk yang lain dinyatakan pada Gambar 2.28.

Tegangan-tegangan pada terminal A, B dan C pada setiap state dapat dinyatakan sebagaimana terlihat pada Tabel 2.31. State-1, state-2 dan seterusnya sampai dengan state-6 dinamakan sebagai *state aktif*, sedang state-0 dan state-7 dinamakan sebagai *state-nol* (zero- state). State nol adalah state dimana semua tegangannya adalah nol.



Gambar 2.29 Kombinasi Saklar abc yang dinyatakan dalam state

Tegangan-tegangan antara saluran  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$ , dan  $V_{CA}$  dapat dinyatakan sebagai:

$$\begin{bmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{bmatrix} = V_{DC} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.30)$$

dengan a, b, dan c adalah kombinasi dari saklar-saklar dari state.

Tabel 2.3 Tegangan untuk tiap kombinasi

State	a	b	c	V <sub>AB</sub>	V <sub>BC</sub>	V <sub>CA</sub>
1	1	0	0	V <sub>DC</sub>	0	-V <sub>DC</sub>
2	1	1	0	0	V <sub>DC</sub>	-V <sub>DC</sub>
3	0	1	0	-V <sub>DC</sub>	V <sub>DC</sub>	0
4	0	1	1	-V <sub>DC</sub>	0	V <sub>DC</sub>
5	0	0	1	0	-V <sub>DC</sub>	V <sub>DC</sub>
6	1	0	1	V <sub>DC</sub>	-V <sub>DC</sub>	0
0	0	0	0	0	0	0
7	1	1	1	0	0	0

Jika suatu beban seimbang dalam hubungan bintang dihubungkan pada terminal A,B, dan C, maka akan terbentuk titik netral N. Tegangan titik netral tersebut adalah:

$$V_N = \frac{1}{3}(V_A + V_B + V_C) \dots\dots\dots(2.31)$$

Tegangan-tegangan fase terhadap netral V<sub>a</sub>, V<sub>b</sub>, dan V<sub>c</sub>, menjadi:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3}V_{DC} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.32)$$

Bila 6 state-aktif tersebut disusun menurut urutan sedemikian rupa, maka akan dapat dibentuk gelombang-gelombang tegangan sebagaimana terlihat pada Gambar 2.32. Tegangan-tegangan V<sub>a</sub>, V<sub>b</sub>, dan V<sub>c</sub> masing-masing berbeda fasa sebesar 120°. Komponen dasar dari gelombang tegangan yang periodik tersebut menurut deret Fourier mempunyai magnitudo sebesar:

$$V_{1max} = \frac{4}{\pi} \frac{V_{DC}}{2} \dots\dots\dots(2.33)$$

### 2.9.3. Performansi Utama Inverter

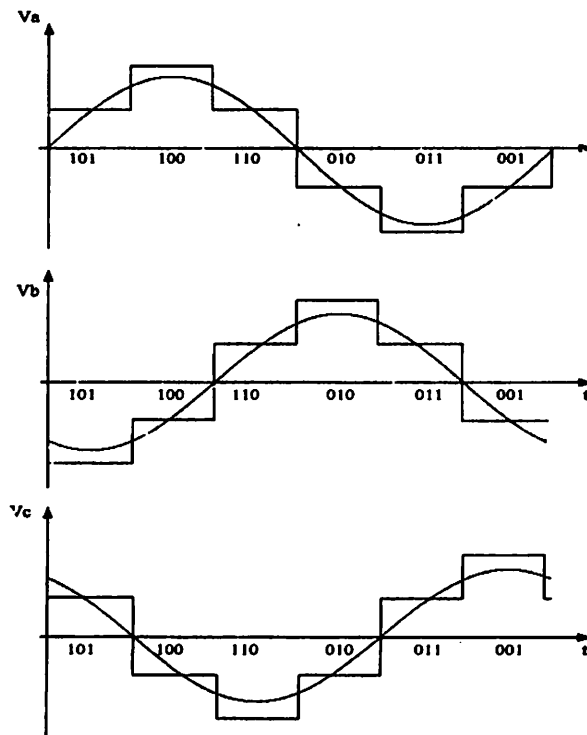
Pada praktisnya output inverter pasti mengandung harmonisa dan kualitas sebuah inverter biasanya dinilai dari parameter performa yang mengikutinya (Distorsi Tegangan).

#### 2.9.3.1. Faktor harmonisa dari $n^{\text{th}}$ harmonic, $HF_n$

Faktor harmonisa (dari  $n^{\text{th}}$  harmonic), sebagai ukuran kontribusi harmonisa individu didefinisikan:

$$HF_n = \frac{V_n}{V_1} \dots\dots\dots(2.34)$$

dengan  $V_1$  adalah nilai rms dari komponen dasar dan  $V_n$  ialah nilai rms komponen harmonisa ke-n.



Gambar 2.30 Bentuk Gelombang Tegangan Inverter 3 Fasa

### 2.9.3.2. Total Harmonic Distortion(THD)

Total distorsi harmonisa, sebagai ukuran kedekatan bentuk antara bentuk gelombang dengan komponen dasar, didefinisikan:

$$THD = \frac{1}{V_1} \left( \sum_{n=2,3..}^{\infty} V_n^2 \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(2.35)$$

### 2.9.3.3. Faktor Distorsi (DF)

THD memberikan total isi harmonisa, tetapi hal itu tidak menunjukkan tingkatan tiap komponen harmonisa. Jika sebuah filter digunakan pada output inverter, orde harmonisa yang lebih tinggi diperkuat lebih efektif. Oleh karena itu pengertian dari frekuensi dan magnitudo tiap harmonisa sangat penting. Faktor distorsi menunjukkan jumlah distorsi harmonisa yang tersisa pada sebagian bentuk gelombang harmonisa ditunjukkan kepenguatan orde dua (dibagi dengan  $n^2$ ). Demikian DF adalah ukuran keefektifan dalam mengurangi harmonisa-harmonisa yang tidak diinginkan tanpa mengkhususkan nilai-nilai beban filter orde dua dan didefinisikan:

$$DF = \frac{1}{V_1} \left[ \sum_{n=2,3..}^{\infty} \left( \frac{V_n}{n^2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(2.36)$$

### 2.9.3.4. Harmonisa Orde Terendah, LOH

Orde harmonisa terendah ialah komponen harmonisa yang frekuensinya mendekati frekuensi dasar dan amplitudonya lebih besardari sekitar 3% amplitudo komponen dasar. Sebagai contoh yaitu gelombang persegi (square wave). Besar tegangan rms dapat dicari melalui rumus:

$$V_o = \frac{2}{T_o} \left( \int_0^{\frac{T_o}{2}} V_s^2 dt \right)^{\frac{1}{2}} = V_s$$

Besarnya tegangan output dinyatakan deret fourier

$$V_o = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{4V_s}{n\pi} \sin(n\omega t) \dots\dots\dots(2.37)$$

Sehingga besar tegangan fundamental dapat dicari dari

$$V_1 = \frac{4V_s}{\sqrt{2\pi}} = 0.9V_s$$

Dari rumus THD,

$$THD = \frac{\sqrt{V_{rms}^2 - V_1^2}}{V_1} \dots\dots\dots(2.38)$$

Maka THD dari gelombang persegi dapat dihitung sebesar

$$THD = \frac{\sqrt{V_s^2 - 0.9V_s^2}}{0.9V_s} = 48.43\%$$

## **2.10. Kontrol Tegangan Dari Inverter**

Untuk penerapan diindustri, diperlukan adanya pengendalian dari tegangan output inverter, untuk mengatasi variasi tegangan input dc, untuk pengaturan tegangan inverter, untuk mengatur tegangan/frekuensi supaya tetap. Ada banyak macam teknik pengaturan gain inverter. Metode pengaturan gain paling efisiensi adalah dengan metode PWM. Metode PWM ini memerlukan gelombang Carrier dan referensi untuk menghasilkan serangkaian logika pulsa kontrol gate inverter.

### **2.10.1. Kontrol Gate Inverter Satu Fasa**

Berdasarkan bentuk gelombang referensi dan carrier ini, metode PWM untuk inverter 1 fasa mempunyai beberapa teknik yaitu:

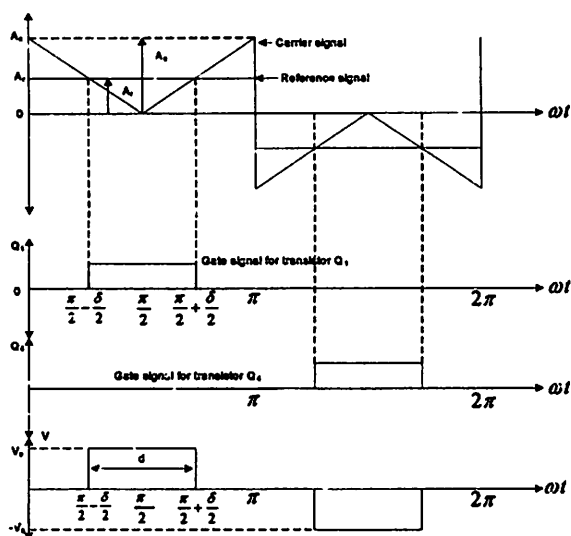
- a. *Single-Pulse Width Modulation (Single-PWM).*
- b. *Multi-Pulse Width Modulation (Multi-PWM).*
- c. *Sinusoidal-Pulse Width Modulation (Sinusoidal-PWM).*
- d. *Modifiet-Pulse Modulation (Modifiet-PWM).*
- e. *Phase Displacement Control.*

Untuk lebih memudahkan pemahaman akan proses terbentuknya pulsa kontrol gate inverter maka dibawah ini diberi contoh salah satu teknik dari metode PWM yaitu teknik *Single Pulse Width Modulation (Single-PWM).*



Untuk kontrol single-PWM, hanya ada satu pulsa tiap satu siklus dan lebar pulsa diubah untuk mengontrol tegangan output inverter. Gambar 2.33. menunjukkan pembangkit sinyal kontrol gate dan tegangan output *single phase full bridge inverter*.

Sinyal untuk kontrol gate dibangkitkan dengan membandingkan amplitudo sinyal referensi rectangular  $A_r$ , dengan sinyal carrier triangular  $A_c$ . Frekuensi sinyal referensi menentukan frekuensi tegangan dasar output.



Gambar 2.31  
Single-PWM

. Output tegangan sesaat  $v_o = V_s(g_1 - g_2)$ . Rasio  $A_r$  terhadap  $A_c$  merupakan variabel kontrol yang didefinisikan sebagai indeks modulasi. Besarnya indeks modulasi ( $M$ ) diberikan dengan persamaan:

$$M = \frac{A_r}{A_c} \dots\dots\dots (2.39)$$



Sedangkan nilai rms tegangan output adalah:

$$V_o = \left( \frac{2}{2\pi} \int_{(\pi-\delta)/2}^{(\pi+\delta)/2} V_s^2 d(\omega t) \right)^{1/2} = V_s \sqrt{\frac{\delta}{\pi}} \dots\dots\dots(2.40)$$

Dengan mengubah  $\delta$  dari 0 ke  $\pi$  maka lebar pulsa \* dapat diubah-ubah dari 0° ke 180°, sehingga nilai rms tegangan output dapat diubah-ubah antara 0 sampai  $V_s$ . Sedangkan tegangan output sesaatnya jika ditulis dalam deret fourier seperti pada persamaan 2.22 adalah:

$$V_o = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_s}{n\pi} \sin \frac{n\delta}{2} \sin(n\omega t) \dots\dots\dots(2.41)$$

Performansi output tegangan dengan menggunakan metode *single-PWM* diperlihatkan pada Gambar 2.33. Gambar tersebut memperlihatkan hubungan antara besarnya harmonisa terhadap indeks modulasi ( $M$ ), dan DF meningkat dengan rendahnya tegangan output.

Titik potong waktu dan sudut dapat dicari dengan persamaan :

$$t_1 = \frac{\alpha_1}{\omega} = (1 - M) \frac{T_s}{2}$$

$$t_2 = \frac{\alpha_2}{\omega} = (1 + M) \frac{T_s}{2}$$

Sedangkan lebar pulsa dari sinyal PWM:

$$d = \frac{\delta}{\omega} = t_2 - t_1 = MT_s$$

dengan  $T_s = T/2$

### 2.10.2. Kontrol Gate Inverter Tiga Fasa

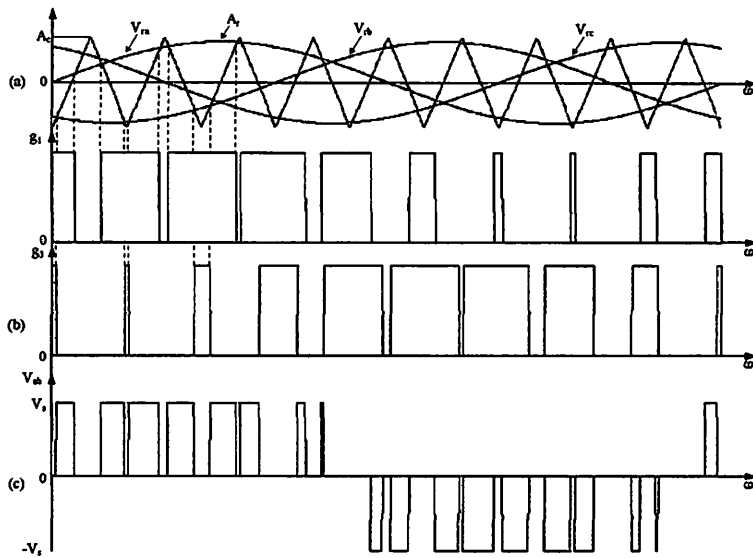
Ada beberapa teknik didalam pembangkitan sinyal kontrol gate inverter 3 fasa, antara lain:

1. Sinusoidal PWM.
2. Third-harmonic PWM.
3. 60° PWM.
4. Space Vector Modulation.

#### 2.10.2.1 Sinusoidal PWM

Metode sinusoidal PWM terlihat seperti pada Gambar 6.27a. Terdapat tiga sinyal referensi sinusoidal ( $v_{ra}$ ,  $v_{rb}$ ,  $v_{rc}$ ) dan setiap sinyal bergeser sebesar 120°. Dengan membandingkan antara sinyal referensi tiap fasa  $v_{ra}$ ,  $v_{rb}$ ,  $v_{rc}$  dengan sinyal carier  $v_{cr}$  maka akan terbentuk sinyal gate  $g_1$ ,  $g_3$ ,  $g_5$  seperti terlihat pada Gambar 2.27b. Besarnya tegangan output *line-to-line* sesaat ialah:

$$v_{ab} = V_s(g_1 - g_3) \dots\dots\dots(2.42)$$



Gambar 2.32  
Sinyal sinusoidal PWM

### 2.10.2.2. Space Vector PWM

Space vector modulation(SVM) sebuah teknik pembangkitan sinyal kontrol gate yang berbeda dengan metode PWM pada umumnya. Dengan metode PWM, setiap gelombang fasa yang terbentuk bersifat *independent*. Sedangkan dengan SVM sinyal driver untuk inverter 3 fasa dibentuk dari 1 unit. Keluaran inverter dihasilkan dengan mengatur 8 state yang unik, diperlihatkan pada Tabel 2.3.

**2.10.2.2.1 Space Vector**

Space vector merepresentasikan magnitudo dan sudut fase dari sebuah besaran 3 fase simetri sebagai fungsi waktu. Space vector dapat dibayangkan sebagai vector medan putar yang ditimbulkan oleh kumparan-kumparan stator dari mesin arus AC 3φ, sebagaimana terlihat pada Gambar 2.35.a. kumparan a-a', b-b', c-c' menghasilkan medan dalam arah berturut-turut sumbu A, sumbu B, sumbu C. Besar dan arah vector medan adalah resultan dari ketiga komponen medan tersebut. Space vector sesaat dapat ditentukan jika arus sesaat diketahui. Misalkan sebuah sistem 3N seimbang arus  $i_a, i_b, i_c$ .

$$i_a = I_m \sin \omega t$$

$$i_b = I_m \sin (\omega t - 120^\circ)$$

$$i_c = I_m \sin (\omega t + 120^\circ)$$

Pada saat  $t = t_0$  arus  $i_a, i_b, i_c$  (Gambar 2.35.b.) menjadi vector penyusun space vector  $i_s$ . Panjang vector pada arus space vector  $i_s(t)$  ditentukan sama dengan panjang vector  $I_a$  pada keadaan seimbang, sehingga dinyatakan dalam oleh Clarke dalam besaran  $2\phi$  sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} I_{s\alpha}(t) \\ I_{s\beta}(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & \cos \gamma & \cos 2\gamma \\ 0 & \sin \gamma & \sin 2\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.43)$$

Oleh sebab itu pers(2.44) dapat dipandang sebagai persamaan untuk transformasi besaran  $3\phi$  menjadi  $2\phi$ .

Selanjutnya space vector arus  $I_s(t)$  dapat dinyatakan sebagai besaran kompleks berikut:

$$i_s(t) = i_{s\alpha}(t) + ji_{s\beta}(t) \dots\dots\dots(2.44)$$

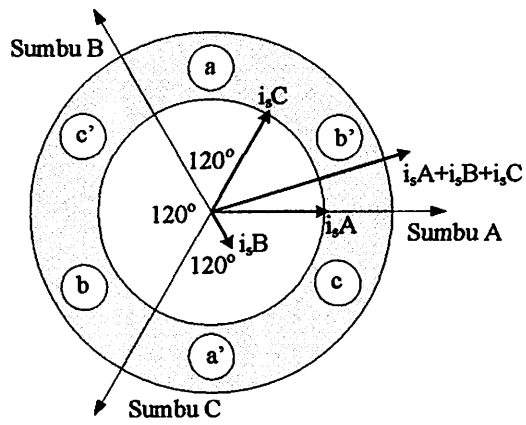
sehingga space vector arus  $i_s(t)$  dapat ditulis sebagai:

$$i_s(t) = \frac{2}{3} [i_{sA}(t) + ai_{sB}(t) + a^2i_{sC}(t)] \dots\dots\dots(2.45)$$

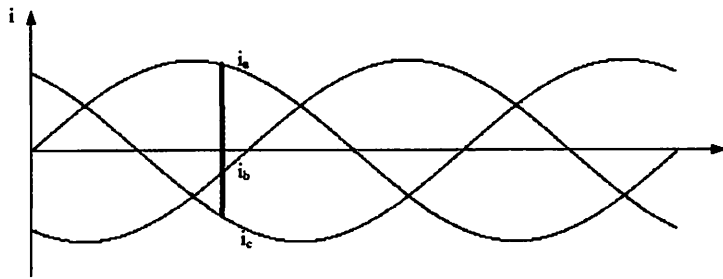
dimana  $a = e^{j\gamma} = \cos\gamma + jsin\gamma$

Demikian pula space vector tegangan  $v_s(t)$  dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} V_{s\alpha}(t) \\ V_{s\beta}(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & \cos \gamma & \cos 2\gamma \\ 0 & \sin \gamma & \sin 2\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.46)$$



(a). space vector arus  $i_s$



(b). arus  $i_a$ ,  $i_b$ , dan  $i_c$  sesaat pada  $t = t_0$ .

Gambar 2.33. Vektor Medan Putar pada Stator

### 2.10.2.2.2. Space Vector Modulation

Sebagaimana diketahui sebelumnya tegangan-tegangan pada state-1 adalah

$$V_a = \frac{2}{3}V_{DC}, \quad V_b = V_c = -\frac{1}{3}V_{DC}$$

Pada state ini, space vector tegangan  $V_{s1}$  dapat dinyatakan dalam bentuk kompleks sebagai berikut:

$$V_{s1} = V_{s\alpha} + jV_{s\beta} = \frac{2}{3}V_{DC} + j0$$

Jadi ada 6 sektor yang dapat berbeda yang dapat dibuat berdasarkan state-nya karena state-0, dan state-7 adalah vektor nol.

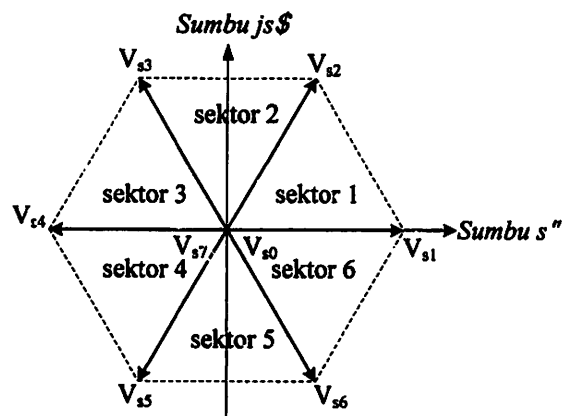
Secara umum untuk state aktif ke-k space vectortegangan  $V_{sk}$  adalah

$$V_{sk} = \begin{cases} \frac{2}{3}V_{DC}e^{j\frac{k-1}{3}\pi} & \text{untuk } k = 1,2,3,\dots \\ 0 & \text{untuk } k = 0,7 \end{cases} \quad (2.47)$$

Keenam vector state aktif tersebut membagi bidang space vector menjadi 6 sektor yang sama. Gambar 2.36. menunjukkan space vector tegangan untuk inverter sumber  $3N$ . Dengan menggunakan modulasi PWM, dimungkinkan untuk membangkitkan tegangan  $3N$  sinusoida dengan referensi vektor tegangan  $V_s$  melalui sintesa vector-vector state. Teknik ini disebut dengan teknik SVPWM



Apabila tegangan state-1 dan state-2 dibangkitkan secara bergantian dan dengan kecepatan tinggi dengan duty cycle masing-masing adalah  $*_1$  dan  $*_2$  dalam selang waktu tertentu, maka vector space tegangan yang dihasilkan oleh state-1, adalah  $V_x$  dan state-2 adalah  $V_y$ . Dengan demikian kedua space vector state-1 dan state-2 membentuk resultan space vector tegangan  $V_s$  sebagai berikut:



Gambar 2.34. SpaceVector PWM

Dari diagram vektor terlihat bahwa sesungguhnya space vector tegangan  $v_s(t)$  pada sektor 1 tidak harus dibentuk oleh vektor-vektor dari state-1 dan state-2, tetapi dengan state yang lain yang mungkin.

Tetapi pada umumnya space vector tegangan  $v_s(t)$  dibentuk oleh vektor dari state-state yang bersebelahan di sektor dimana space vector tegangan yang dikehendaki berada. Jadi space vector tegangan  $v_s$ , pada sektor 2 dibentuk oleh vector state-2 dan state-3., dan demikian pula pada sektor-sektor yang lain.

### 2.10.2.2.3. Indeks Modulasi

Apabila sebuah space vector digunakan untuk menghasilkan tegangan sistem 3N seimbang, dengan magnitudo  $V_1$  dan frekuensi  $\omega_m$  sebagai:

$$V_{AN} = V_1 \sin \omega t$$

$$V_{BN} = V_1 \sin (\omega t + 120^\circ)$$

$$V_{CN} = V_1 \sin (\omega t + 240^\circ)$$

Space vector tegangan referensi diberikan dengan:

$$V_s = V_1 e^{j\omega t} \dots\dots\dots(2.49)$$

Indeks modulasi didefinisikan sebagai perbandingan antara tegangan puncak dari gelombang dasar yang diinginkan dan dibagi dengan setengah dari tegangan searah (DC), atau ditulis:

$$M = \frac{V_1}{V_{DC}/2} \dots\dots\dots(2.50)$$

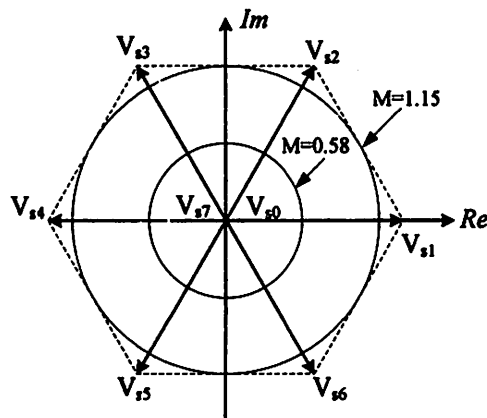
Space vector referensi membuat sebuah trajektori lingkaran dengan radius  $V_1$  dan dengan kecepatan  $\omega_m$  dalam bidang kompleks tersebut. Gambar 2.37. menunjukkan trajektori space vector tegangan referensi untuk  $M = 0,58$  sampai  $M = 1,15$ . Magnitudo terbesar yang dapat dicapai pada teknik modulasi space vector ini terjadi pada radius lingkaran terbesar yang berada didalam segienam.

Tegangan fase dasar maksimum yang dapat dicapai adalah:

$$V_{1, sym} = \frac{V_{DC}}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots(2.51)$$

Dengan demikian indeks modulasi  $M_{max}$  dari inverter adalah:

$$M_{max} = \frac{V_1}{V_{DC}/2} = \frac{V_{DC}/\sqrt{3}}{V_{DC}/2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \approx 1,15$$



Gambar 2.35. Trajektori space vector tegangan referensi untuk  $M=0.58$  dan  $M=1.15$

Pada modulasi lebar pulsa sinusoidal yang konvensional, indeks modulasi maksimumnya satu. Jadi SV PWM memberikan tegangan maksimum 15% lebih besar dari pada PWM konvensional.

#### 2.10.2.2.4 Penentuan sektor

Dalam pembangkitan tegangan sinusoidal pada suatu inverter 3N, maka vector referensi tegangan harus diberikan. Kemudian waktu  $T_m$  dan  $T_{m+1}$  dihitung, dengan lebih dahulu menentukan kedudukan sektornya. Karena vector referensi menyatakan magnitudo dan fasenya, maka vektor tersebut dinyatakan dalam 2 vektor komponen  $V_{s\alpha}$   $V_{s\beta}$ . Sektor dapat ditentukan dengan

$$\zeta = \tan^{-1}\left(\frac{V_{s\alpha}}{V_{s\beta}}\right), \quad 0 \leq \zeta \leq 2\pi \quad \dots\dots\dots(2.52)$$

Secara sederhana sektor m dapat ditentukan sebagai berikut:

1	jika	$0 \leq \zeta \leq \frac{\pi}{3}$	
2	jika	$\frac{\pi}{3} \leq \zeta \leq \frac{2\pi}{3}$	
3	jika	$\frac{2\pi}{3} \leq \zeta \leq \pi$	
4	jika	$\pi \leq \zeta \leq \frac{4\pi}{3}$	
5	jika	$\frac{4\pi}{3} \leq \zeta \leq \frac{5\pi}{3}$	
6	jika	$\frac{5\pi}{3} \leq \zeta \leq 2\pi$	

(2.53)

**2.10.2.2.5 Penentuan Waktu State**

Secara umum apabila sebuah space vector berada pada sektor m, merupakan resultan dari vektor-vektor penyusun  $V_{s, m}$  dan  $V_{s, m+1}$  sehingga berlaku:

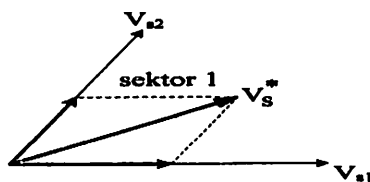
$$V_1^* = \frac{T_m}{T_s} V_{s,m} + \frac{T_{m+1}}{T_s} V_{s,m+1} \dots\dots\dots (2.54)$$

dengan  $T_m$  : waktu aktif inverter pada state m.

$T_{m+1}$  : waktu aktif inverter pada state m+1.

$T_s$  : periode sampling.

Dalam hal ini waktu  $T_m$  dan  $T_{m+1}$  merupakan bagian dari waktu sampling, sedangkan waktu OFF didapat dengan  $T_0=T_s-T_m-T_{m+1}$ . Jadi dalam setiap periode sampling terdapat dua state yang dihidupkan/diaktifkan yaitu state m dan state m+1, selain state nol. Tegangan sesaat  $v_a(t)$ ,  $v_b(t)$ ,  $v_c(t)$  dalam selang periode sampling  $T_s$  yang sedang berada pada sektor 1 dapat digambarkan sebagai komposisi dua buah tegangan  $V_{s1}$  dan  $V_{s2}$  seperti terlihat pada Gambar 2.36.



Gambar 2.36 Vektor-Vektor Komponen pembentuk  $V_s$  pada saat berada di sektor 1

Setelah sektor dari space vector tegangan yang diinginkan telah ditentukan, maka waktu-waktu aktif dari state  $m$  ( $T_m$ ) dan state  $m+1$  ( $T_{m+1}$ ) dari persamaan (2.18) dapat ditentukan sebagai:

$$T_m = \frac{T_s \sqrt{3}}{V_{DC}} \left[ v_{s\alpha} \sin\left(\frac{m\pi}{3}\right) - v_{s\beta} \sin\left(\frac{m\pi}{3}\right) \right] \dots\dots\dots(2.55)$$

$$T_{m+1} = \frac{T_s \sqrt{3}}{V_{DC}} \left[ v_{s\beta} \cos\left(\frac{(m-1)\pi}{3}\right) - v_{s\alpha} \cos\left(\frac{(m-1)\pi}{3}\right) \right] \dots\dots\dots(2.56)$$

Sedangkan waktu nol  $T_{nol}$  diperoleh dari selisih waktu sampling  $T_s$  dan ( $T_m+T_{m+1}$ ) atau ditulis sebagai:

$$T_{nol} = T_0 + T_s = T_s - T_m - T_{m+1} \dots\dots\dots(2.57)$$

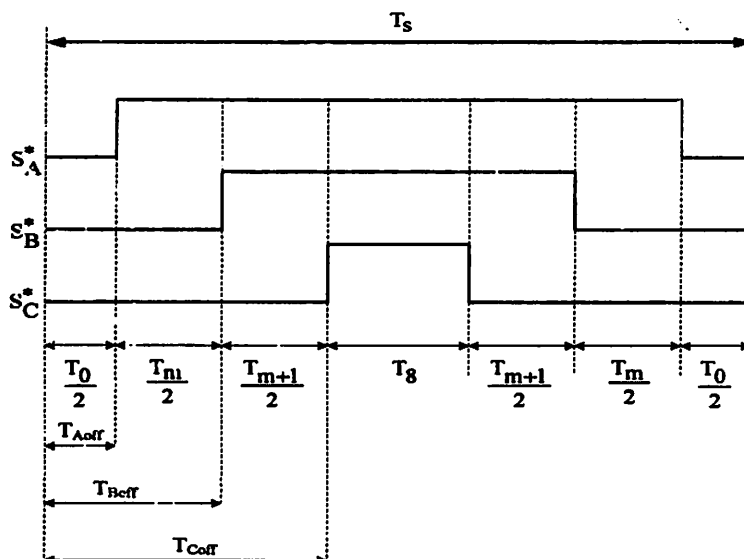
**2.10.2.2.6. Pembangkitan Sinyal Switching Inverter**

Sinyal switching dengan waktu-waktu state aktif dan waktu state nol yang telah ditentukan, dapat dibangkitkan dengan beberapa alternatif urutan state. Disini hanya dibahas tentang SV PWM dengan Urutan Simetris (Symmetric Sequence SV PWM) atau juga disebut dengan SV PWM Dua Tepi (double edge SV PWM). Gambar 2.39 menunjukkan sinyal switching dari inverter SV PWM Urutan Simetris dalam satu periode sampling pada sektor 1.

### 2.11. Kontroler Proposional Integral (PI controller)

Salah satu tugas komponen kontroler adalah mereduksi sinyal kesalahan, yaitu perbedaan antara sinyal setting dan sinyal aktual. Hal ini sesuai dengan tujuan sistem kontrol adalah mendapatkan sinyal aktual senantiasa (diinginkan) sama dengan sinyal setting. Semakin cepat reaksi sistem mengikuti sinyal aktual dan semakin kecil kesalahan yang terjadi, semakin baiklah kinerja sistem kontrol yang diterapkan.

Kontroler proposional memiliki keluaran yang sebanding/proposional dengan besarnya sinyal kesalahan (selisih antara besaran yang diinginkan dengan harga aktualnya) [Sharon, 1992, 19]. Secara lebih sederhana dapat dikatakan, bahwa keluaran kontroler proporsional merupakan perkalian antara konstanta proporsional dengan masukannya.

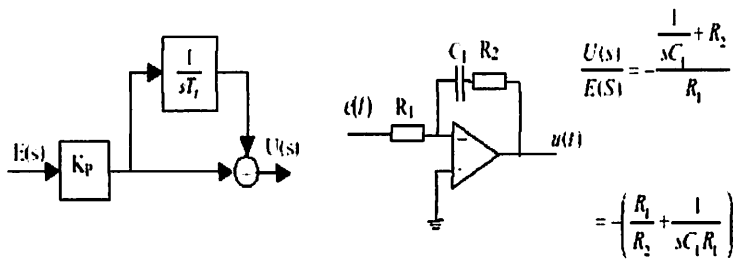


Gambar 2.37 Sinyal Switching Inverter SV PWM Urutan Simetri

Perubahan pada sinyal masukan akan segera menyebabkan sistem secara langsung mengubah keluarannya sebesar konstanta pengalinya. Kontroler integral berfungsi menghasilkan respon sistem yang memiliki kesalahan keadaan mantap nol. Kalau sebuah plant tidak memiliki unsur integrator (1/s), kontroler proporsional tidak akan mampu menjamin keluaran sistem dengan kesalahan keadaan mantapnya nol. Dengan kontroler integral, respon sistem dapat diperbaiki, yaitu mempunyai kesalahan keadaan mantapnya nol.

Kontroler Proporsional Integral (PI) menggabungkan kedua fungsi ini. Persamaan fungsi transfer kontroler PI adalah sebagai berikut :

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_I}{s} \dots\dots\dots(2.58)$$



Gambar 2.38  
Blok diagram dan realisasi PI controller

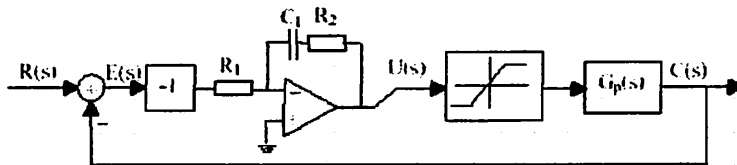


## Tuning PI Controller

### Cara menset kontroler PI

1. Pada awalnya tidak mempunyai gain integral ( $T_i$  besar)
2. Parameter  $K_P$  dinaikkan sampai mencapai respon yang diharapkan
3. Gain integral ditambahkan ( $T_i$  dikurangi) sampai error steady state dapat dihilangkan pada waktu yang ditentukan (Perlu mengurangi  $K_p$  jika kombinasi menyebabkan sistem berosilasi).

Jika integral output tidak dibatasi, selama waktu tersebut total integral plus error akan terus ada. Untuk membatasi hal tersebut diletakkan limiter pada penjumlahan keluaran dari kontroler PI.



Gambar 2.39  
Contoh pemasangan limiter pada keluaran kontroler PI

## **BAB III**

### **PERBAIKAN KUALITAS TEGANGAN MENGGUNAKAN *DYNAMIC VOLTAGE RESTORER (DVR)***

#### **3.1. *Software PSCAD/EMTDC V 4.2 Power Simulation***

PSCAD (*Power System CAD*) adalah *graphical user interface* yang sangat baik dan fleksibel. PSCAD memungkinkan pengguna menggambar mengkonstruksi sebuah rangkaian, menjalankan sebuah simulasi, analisa hasil dan manajemen data terintegrasi secara lengkap. Penggambaran, pengontrolan dan pengukuran juga tersedia, jadi pengguna dapat mengubah parameter sistem, menjalankan simulasi dan melihat hasil secara langsung.

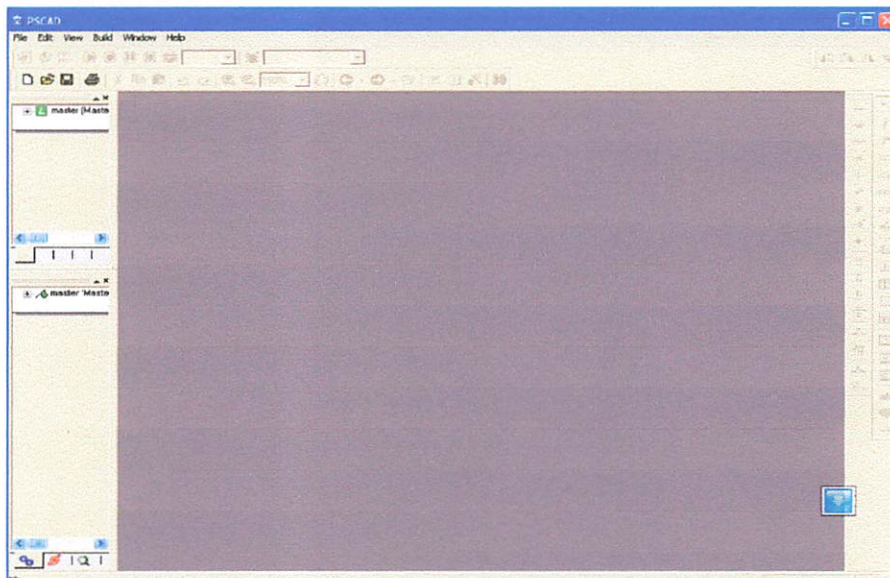
Dibawah ini adalah model umum yang terdapat di dalam studi sistem menggunakan PSCAD/EMTDC:

- *Resistors, inductors, capacitors*
- *Mutually coupled windings, such as transformers*
- *Frequency dependent transmission lines and cables (including the most accurate time domain line model in the world)*
- *Current and voltage sources*
- *Switches and breakers*
- *Protection and relaying*
- *Diodes, thyristors, GTOs, IGBTs*
- *Analog and digital control functions*
- *AC and DC machines, exciters, governors, stabilizers and inertial models*

- *Meters and measuring functions*
- *Generic DC and AC controls*
- *HVDC, SVC, and other FACTS controllers*
- *Wind source, turbines and governors*

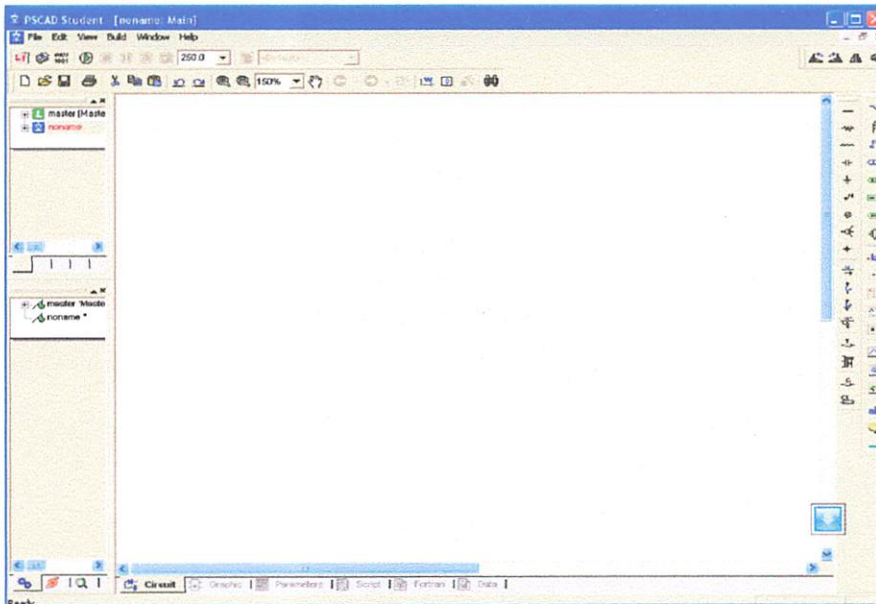
### 3.2. Memulai PSCAD/EMTDC Power Simulation

Tampilan Utama *PSCAD Power Simulation* adalah sebagai berikut :

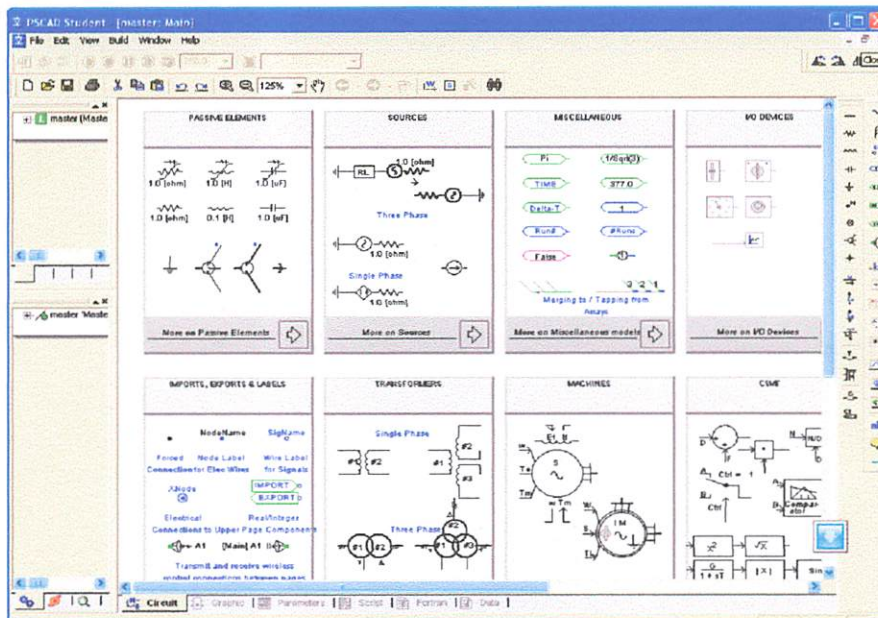


Gambar 3.1

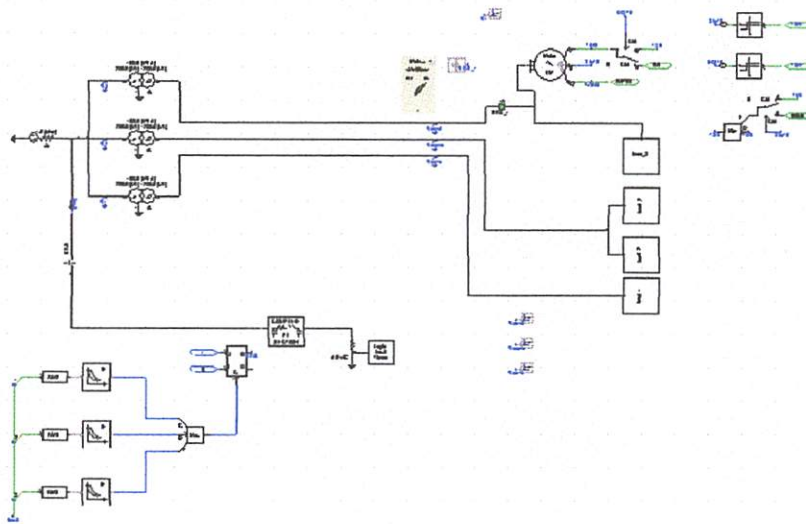
Tampilan utama *Software PSCAD/EMTDC Power Simulation*



Gambar 3.2  
Tampilan Modul Utama



Gambar 3.3  
Tampilan Master Library



Gambar 3.4  
Tampilan *Single Line* System sebelum dipasang DVR Dalam *PSCAD*

### 3.3. Sistem Pengendalian PWM Sinusoida

#### 3.3.1. PWM Sinusoida

Gelombang sinusoidal pada tiga VSC dikendalikan dengan teknik PWM. Rencana Kendali berdasarkan PWM berkenaan dengan D-STATCOM diterangkan pada bagian ini. Rencana Kendali untuk DVR mengikuti prinsip yang sama. Tujuan rencana kendali adalah untuk memelihara *magnitude* tegangan konstan suatu beban sensitif. Sistem kendali mengukur tegangan rms di titik beban. tidak dibutuhkan pengukuran daya reaktif. strategi penyakelaran VSC adalah didasarkan pada suatu teknik PWM sinusoidal, yang sederhana dan memberikan respon yang baik. Metode PWM menawarkan suatu pilihan yang lebih fleksibel. Suatu sinyal error diperoleh dengan membandingkan tegangan acuan dengan tegangan rms pengukuran di titik beban. pengontrol PI memproses sinyal error

dan menghasilkan sudut penundaan yang diperlukan ( $\delta$ ) untuk membawa kesalahan itu menjadi nol. Dalam generator PWM, kendali sinyal sinusoidal adalah *phase-modulated* dengan cara sudut  $\delta$ . Sinyal yang diatur dibandingkan dengan suatu sinyal bersegi tiga (*carrier*) dalam rangka menghasilkan sinyal penyakelaran untuk VSC. parameter utama dalam rencana sinusoidal PWM adalah index sinyal amplitudo modulasi ( $m_a$ ) pada sinyal  $V_{control}$ , dan sinyal segi tiga pada index modulasi frekuensi ( $m_f$ ). Index Amplitudo  $M_a$  dipertahankan tetap pada 1 pu, dalam hal memperoleh komponen dasar tagangan tinggi pada pengontrol keluaran. frekwensi *Switching* ditetapkan pada 450 Hz,  $M_f= 9$ , dan kasus pengujian dilakukan pada jaringan yang stabil. Sudut modulasi diterapkan pada pembangkit sinyal PWM pada fasa A. untuk fasa B dan C dengan pergeseran berturut-turut  $120^\circ$  dan  $240^\circ$ . Penerapan pengendalian sangat sederhana dengan menggunakan sinyal tegangan sebagai variabel umpan balik dalam perencanaan pengontrolan. Kecepatan respon dan efektifitas perencanaan pengontrolan ditunjukkan dalam hasil simulasi.

### **3.3.2. Aksi Kontrol PWM Sinusoida Terhadap DVR**

Prinsip dari DVR adalah menerima dan memproses sinyal *error* dari sumber. Hasilnya kemudian dimasukkan ke PWM *Voltage Source Converter* tiga fasa pada rangkaian utama. Dari hasil perhitungan arus referensi yang dihasilkan oleh sinyal *error* antara tegangan beban dengan tegangan referensi. Jadi sinyal yang diolah oleh PWM merupakan sinyal referensi yang diperoleh dari hasil

perhitungan tersebut. Sinyal referensi ini kemudian dimodulasikan dengan sinyal *carrier* (*triangular wave*) yang berupa sinyal gigi gergaji (*saw tooth*).

Sinyal *error* ini berbentuk sinusoidal yang dimodulasikan dengan sinyal gigi gergaji sebagai sinyal *carrier*.

*Output* dari PWM di atas digunakan untuk mentrigger rangkaian *switching* yang terdiri atas 6 IGBT tiap fasa terdiri dari 2 IGBT.

### **3.4. Aksi Kontrol Proporsional Integral (PI)**

#### **3.4.1. Umum**

Kontrol otomatis telah memegang peranan yang sangat penting dalam perkembangan ilmu dan teknologi. Disamping banyak diperlukan pada pesawat ruang angkasa, peluru kendali, sistem pengemudi pesawat dan sebagainya. Kontrol otomatis telah menjadi bagian penting dan terpadu dari proses-proses dalam pabrik dan industri modern. Misalnya, kontrol otomatis telah memegang peranan yang sangat penting dalam pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi. Disamping banyak diperlukan pada pesawat ruang angkasa, peluru kendali, sistem pengemudi pesawat, dan sebagainya. Kontrol otomatis telah menjadi bagian yang sangat penting dan terpadu dari proses – proses dalam pabrik dan industri modern. Misalnya, kontrol otomatis sangat diperlukan di dalam dunia industri seperti pengontrolan tekanan, suhu, kelembaban, viskositas, dan arus dalam industri proses.

Karena kemajuan dalam teori dan praktek kontrol otomatis memberikan kemudahan dalam mendapatkan performansi dari sistem dinamik, mempertinggi kualitas dan menurunkan biaya produksi, mempertinggi laju produksi, meniadakan pekerjaan-pekerjaan rutin dan membosankan yang harus dilakukan oleh manusia, dan sebagainya.

Sejarah perkembangan. Hasil karya pertama yang sangat penting dalam kontrol otomatis adalah governor sentrifugal untuk pengontrolan kecepatan mesin uap yang dibuat oleh *James Watt* pada abad ke delapan belas. Hasil karya lainnya yang penting pada tahap awal perkembangan teori kontrol dibuat oleh *Minorsky*, *Hazen*, *Nyquiste*, dan sebagainya. Pada tahun 1922, *Minorsky* membuat kontroler otomatis untuk mengendalikan pengemudian kapal dan menunjukkan cara menentukan kestabilan dari persamaan differensial yang melukiskan sistem. Pada tahun 1932 *Nyquis* mengembangkan suatu prosedur yang relatif sederhana untuk menentukan kestabilan sistem loop tertutup pada basis sistem loop terbuka terhadap masukan tunak (*steady state*) sinusoida. Pada tahun 1934 *Hazen*, yang memperkenalkan istilah servomekanis untuk sistem kontrol posisi, membahas desain servomekanis relay yang mampu mengikuti dengan baik masukan yang berubah. Selama dasawarsa 1940-an, metode respon frekuensi memungkinkan para insinyur untuk mendesain sistem kontrol linier berumpan balik yang memenuhi persyaratan kinerja. Metode respon frekuensi dan tempat kedudukan akar, yang merupakan inti teori kontrol fisik, akan membawa sistem yang stabil dan memenuhi seperangkat persyaratan kinerja yang hampir seimbang.



Hampir semua proses dalam industri membutuhkan peralatan – peralatan otomatis untuk mengendalikan parameter – parameter prosesnya. Otomatisasi tidak saja diperlukan demi operasi, keamanan, ekonomi maupun mutu produk, tetapi lebih merupakan kebutuhan pokok. Kelak akan dipelajari alat tidak mungkin menjalankan suatu proses industri tanpa bantuan sistem pengendali. Contohnya adalah pengendalian penggilingan minyak. Proses disuatu penggilingan minyak tidak mungkin dapat dijalankan tanpa bantuan fungsi sistem dari pengendalian.

Ada banyak parameter yang baru dikendalikan di dalam suatu proses. Diantaranya yang paling umum adalah tekanan (*pressure*) didalam sebuah *vessel* atau pipa, aliran (*flow*) didalam pipa, suhu temperatur di unit proses seperti *heat exchanger*, atau permukaan zat cair (*level*) disebuah tangki. Ada beberapa parameter lain diluar keempat parameter diatas yang cukup penting dan perlu dikendalikan karena kebutuhan spesifik proses, diantaranya : PH di industri petrokimia, *water cut (w&w)* diladang minyak mentah, warna produksi suatu fasilitas pencairan gas (NGL) dan sebagainya.

Gabungan serta kerja alat-alat pengendalian otomatis inilah dinamai sistem pengendalian proses (proses contoh sistem). Sedangkan semua peralatan yang menjalankan sistem pengendali disebut instrumentasi pengendalian proses (*Process Control Instrumentation*).

Kedua hal ilmu tersebut berhubungan satu dengan yang lain, dimana keduanya mempunyai hakikat yang berbeda. Pembahasan tentang ilmu proses kontrol sistem lebih dipusatkan pada kerja sistem, sering kali diperlukan penjelasan melalui alat kerja.

### 3.4.2. Prinsip-Prinsip Pengendalian Proses

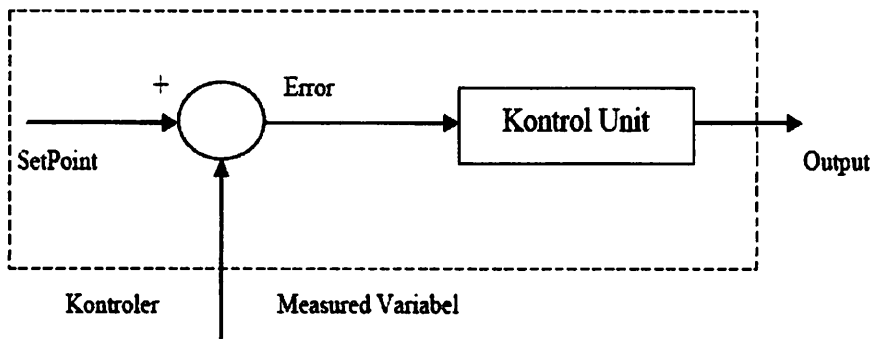
Dalam pengendali proses, operator mengerjakan empat langkah sebagai berikut: *Mengukur, Membandingkan, Menghitung dan Mengoreksi*. Keempat langkah yang dilakukan operator itu, seluruhnya dapat dikerjakan oleh instrumentasi. Manusia kemudian sama sekali tidak menentukan keempat langkah tadi. Operator hanya perlu menentukan besarnya *set point*, dan semuanya akan dikerjakan secara otomatis oleh instrument. Sistem pengendali semacam inilah yang disebut sistem pengendali otomatis (*automatik control system*). Keempat tahap pengendaliannya, sepenuhnya dilakukan oleh instrumentasi. Mata rantai pengendalinya kemudian disebut mata rantai tertutup, dan sistemnya juga disebut sistem pengendalian tertutup atau *sistem closed loop*.

### 3.4.3. Prinsip Kerja Pengendali

Ada tiga jenis pengendali kontinu, yaitu pengendali proposional di singkat P, pengendali integral di singkat I, dan pengendali diferensial di singkat D. Karena kelebihan dan kekurangan ketiga pengendali itu, mereka seringkali dipakai dalam bentuk kombinasi, yaitu P+I disingkat PI, P+D disingkat PD, dan P+I+D disingkat PID. Ketiga jenis pengendali ini memberikan respon yang berbeda-beda. Pada dasarnya, tugas sebuah pengendali kontinu terbagi dalam dua tahap, yaitu membandingkan dan menghitung.

Pembandingan itu sendiri dilakukan dengan mengurangi besarnya *set point* dengan besaran *measurement variabel*, yang hasilnya adalah besaran yang disebut *error*. Karena *set point* bisa lebih besar atau lebih kecil dari *measurement*

*variable*, nilai *error* bisa positif dan bisa juga negatif. Jadi *error* adalah input unit kontrol dan *manipulated variable* adalah output unit kontrol. Besarnya *manipulated variable* dihitung berdasarkan *error* dan *transfer function* unit kontrol. Bentuk *transfer function* dari unit kontrol terhitung pada “mode” yang ada dikontroler.



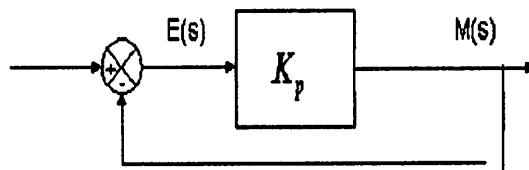
Gambar 3.5  
Kontroler Dan Diagram Kotaknya

#### 3.4.4. Pengendali Proporsional (*Proporsional Controller*)

Salah satu dari ketiga unit kontrol yang paling populer dan paling banyak dipakai adalah unit kontrol P, seperti tercermin dari namanya, besar *output* unit kontrol P selalu sebanding dengan besarnya *input*. Bentuk *transfer function* unit kontrol *proporsional* oleh karenanya akan sederhana sekali, sehingga bentuk *transfer function*-nya juga sederhana. Unit kontrol P adalah unit kontrol yang paling banyak dipakai, baik tersendiri dalam bentuk pengendali *P-only* maupun dalam kombinasi dengan mode integral (I) dan differensial (D).

Kontroler proporsional memiliki keluaran yang sebanding / proporsional dengan besarnya sinyal kesalahan (selisih antara besaran yang diinginkan dengan harga aktualnya). Secara lebih sederhana dapat dikatakan bahwa keluaran

kontroler proporsional merupakan perkalian antara konstanta proporsional dengan masukan. Perubahan pada sinyal masukan akan segera menyebabkan sistem secara langsung mengubah keluarannya sebesar konstanta pengalinya. Gambar 3.2 menunjukkan blok diagram yang menggambarkan hubungan antara besaran *setting*, besaran *actual* dengan besaran keluaran kontroler proporsional. Sinyal kesalahan (*error*) merupakan selisih antara besaran *setting* dengan besaran aktualnya. Selisih ini akan mempengaruhi kontroler, untuk mengeluarkan sinyal positif (mempercepat pencapaian harga *setting*) atau negative (memperlambat tercapainya harga yang diinginkan).



Gambar 3.6  
Diagram Blok Kontroler Proporsional

Kontroler proporsional memiliki 2 parameter, yaitu pita proporsional (*proporsional band*) dan konstanta proporsional.

Hubungan antara pita proporsional (*PB*) dengan konstanta proporsional ( $K_p$ ) ditunjukkan secara prosentase oleh persamaan berikut ini :

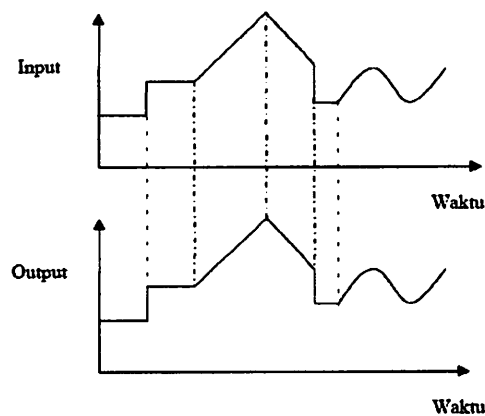
$$PB = \frac{1}{K_p} \times 100\%$$

Dimana:

**PB = Proporsional Band**

**Kp = Konstanta Proporsional**

Walaupun hubungan input-output unit kontrol proporsional bukan merupakan fungsi waktu, untuk bahan perbandingan dengan unit kontrol lain, ada baiknya kalau hubungan itu dinyatakan dalam bentuk kurva fungsi waktu. Dari gambar 3.3 jelas terlihat bahwa output selalu mengikuti input secara proporsional. Naik turunnya input diikuti secara langsung oleh output, dan besarnya selalu sama dengan input kali gain. Karena unit kontrol proporsional ini bukan fungsi waktu, dinamik gain pengendali ini sama dengan *steady state* gainnya. Dengan kata lain, besarnya gain tidak tergantung pada besarnya frekuensi loop.



Gambar 3.7  
Response Sebuah Pengendali Proporsional

Contoh pengendali integral proporsional yang mudah ditemui dalam kehidupan sehari-hari adalah pengisian tangki penampung air di kloset. Hal yang perlu diperhatikan pada contoh ini adalah bahwa kontrol unit di contoh bekerja secara proporsional. Artinya, koreksi dalam hal ini buka tutupnya *control valve* akan selalu sebanding dengan ketinggian level. *Set point* dalam hal ini adalah sama dengan ketinggian level maksimum.

### 3.4.5. Pengendali Integral (*Integrator Controller*)

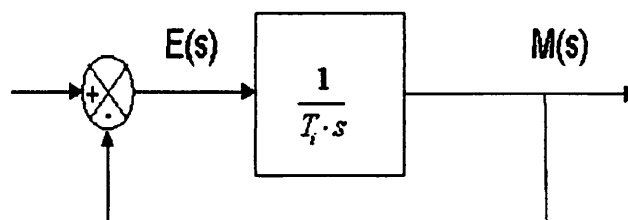
Setelah pengendali proporsional diketahui “gagal” mengendalikan sistem secara sempurna dalam arti masih adanya *offset*. Dikarenakan sifat dasar pengendali proporsional yang masih memerlukan *error* untuk menghasilkan *output*. Oleh karena itu, untuk menghilangkan *offset*, diperlukan pengendali lain yang dapat menghasilkan *output* walaupun sudah tidak ada *input* lagi. Sifat unit inilah yang dimiliki oleh pengendali integral. Sayangnya, kemampuan pengendali integral menghilangkan *offset* tidak disertai kemampuan bereaksi secara cepat. Karena lambatnya reaksi tersebut maka pengendali integral biasanya dipakai dalam kombinasi dengan pengendali proporsional. Kedua pengendali tersebut dipasang secara paralel sehingga kelebihan kedua pengendali dapat dimanfaatkan secara serempak. Kalau diteliti dengan seksama, *offset* dapat terjadi di sistem pengendali proporsional, karena pengendali proporsional selalu membutuhkan *error* (dalam hal ini *input* ke *unit control*) untuk menghasilkan suatu *output*. Kalau tidak ada *error*, *output* yang keluar dari pengendali proporsional hanyalah bias yang biasanya disetel 50%.

Jadi untuk menghasilkan *offset* dibutuhkan sebuah pengendali lain, yang dapat menghasilkan *output* walaupun padanya tidak diberikan *input*. Dengan kata lain, diperlukan pengendali yang dapat menghasilkan *output* lebih besar atau lebih kecil dari bias pada saat *input* (*error*) sama dengan nol. Pengendali yang memenuhi kriteria ini adalah pengendali integral, disingkat I.

Kontroler integral berfungsi menghasilkan respon sistem yang memiliki kesalahan keadaan mantap nol. Kalau sebuah plant tidak memiliki unsur *integrator* ( $1/s$ ),

kontroler proporsional tidak akan mampu menjamin keluaran sistem dengan kesalahan keadaan mantapnya nol. Dengan kontroler integral, respon sistem dapat diperbaiki, yaitu mempunyai kesalahan keadaan mantapnya nol. Kontroler integral memiliki karakteristik seperti halnya sebuah integral. Keluaran kontroler sangat dipengaruhi oleh perubahan yang sebanding dengan nilai sinyal kesalahan. Keluaran kontroler ini merupakan jumlahan yang terus menerus dari perubahan masukannya. Kalau sinyal kesalahan tidak mengalami perubahan, keluaran akan menjaga keadaan seperti sebelum terjadinya perubahan masukan.

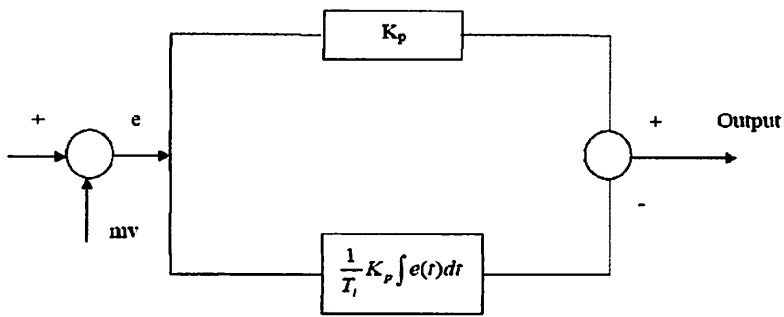
Gambar 3.4 menunjukkan blok diagram antara kesalahan dengan keluaran suatu kontroler integral.



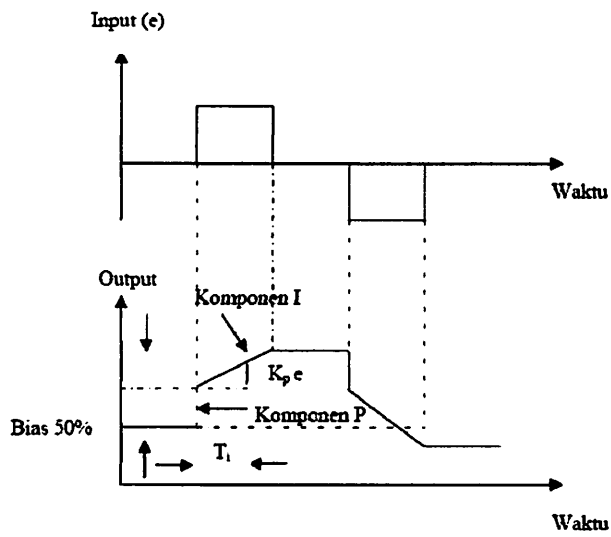
Gambar 3.8  
Blok Diagram Kontroler Integral

### 3.4.6. Pengendali Proporsional Integral (*PI Controller*)

Karena sifatnya yang tidak mengeluarkan *output* sebelum selang waktu tertentu, pengendali integral jadi memperlambat respon, walaupun *offset* hilang oleh karenanya. Untuk memperbaiki lambatnya respon, umumnya pengendali integral dipasang paralel dengan pengendali proporsional seperti *gambar 3.7*. Gabungan kedua pengendali tersebut lazim disebut dengan pengendali PI atau PI kontroler, dan pengendali dikatakan punya dua mode, yaitu P dan I.



Gambar 3.9  
Diagram Kotak Pengendali PI



Gambar 3.10  
Hubungan Input-Output Pengendali PI dalam Fungsi Waktu



### **3.5. Kompensasi DVR**

#### **3.5.1. Sistem Distribusi Tanpa Kompensasi DVR**

Hampir semua beban dalam sistem tenaga listrik didominasi oleh beban-beban induktif seperti motor-motor listrik, inverter, UPS dan masih banyak lagi peralatan yang menggunakan komponen-komponen induktif yang berakibat menimbulkan gangguan kestabilan tegangan. Untuk mengatasi permasalahan ini DVR menawarkan pengendalian yang fleksibel dalam mengatasi permasalahan yang ditimbulkan oleh beban-beban tersebut. Ini mungkin dilakukan dengan adanya perkembangan piranti elektronika daya yang berkembang cukup pesat, *full controllable* dan penggunaannya dapat dipadukan ke dalam sistem tenaga listrik baik sisi tegangan tinggi maupun tegangan rendah. Dalam hal ini DVR dilengkapi dengan pengendali PI dan kontrol SPWM.

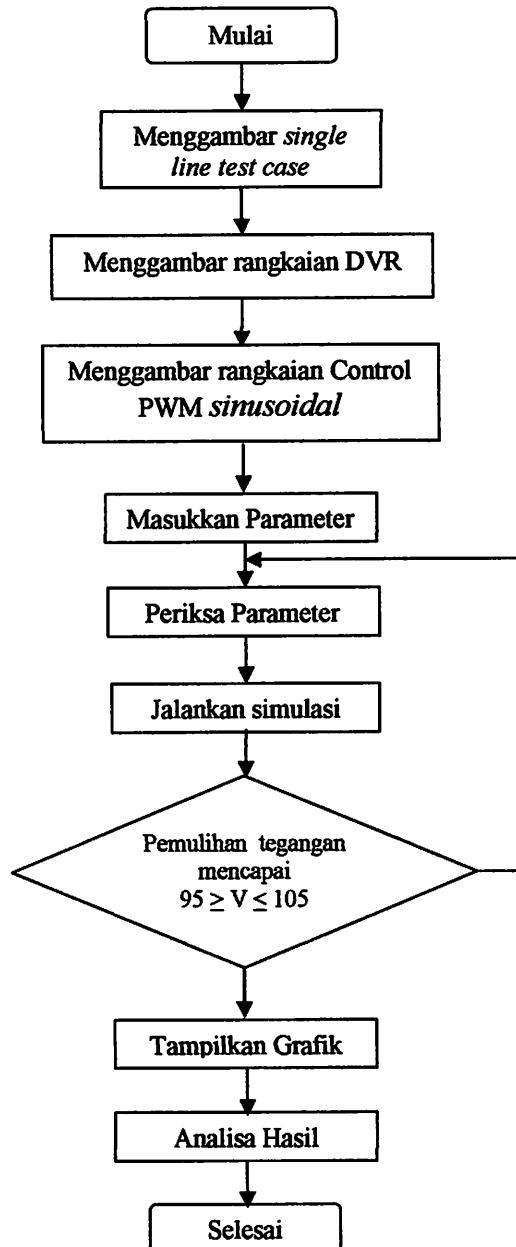
#### **3.5.2. Sistem Distribusi Dengan Kompensasi DVR**

Ketidakstabilan tegangan dalam sistem distribusi bisa menyebabkan terjadinya pemborosan energi listrik. Ketidakstabilan itu dapat diartikan tegangan pada suatu fase lebih besar, lebih kecil atau berfluktuasi terhadap tegangan standar. Sedangkan akibat pemborosan energi listrik itu maka timbul panas sehingga bisa menyebabkan pertama kerusakan isolator peralatan yang dipakai. Ke dua memperpendek daya isolasi pada lilitan. Sementara itu dengan ketidakseimbangan sebesar 3% saja dapat memperbesar suhu motor yang sedang beroperasi sebesar 18% dari keadaan semula. Hal ini tentunya akan menimbulkan suara bising pada motor dengan kecepatan tinggi.

Untuk mengoptimalkan pemakaian energi listrik bisa digunakan beban-beban tiruan berupa LC yang dilengkapi dengan teknologi pengendalian. Sehingga ketepatan dan keandalan dalam mendeteksi kualitas daya listrik bisa diperoleh. pengendali itu berfungsi untuk mengolah komponen-komponen yang menentukan kualitas tenaga listrik. Seperti keseimbangan beban antar fasa dan harmonik. Apabila terdapat ketidakseimbangan antara fasa satu dengan fasa yang lainnya, maka pengendali akan memerintahkan bebar-beban LC untuk membuka atau menutup agar arus disuplai ke fasa satu sehingga selisih arus antara fasa satu dengan fasa yang lainnya tidak ada. Banyaknya L atau C yang dibuka atau ditutup tergantung dari kondisi ketidakseimbangan beban yang terdeteksi oleh pengontrol. Komponen LC yang dimaksudkan diatas sudah terintegrasi dalam peralatan DVR.

### 3.6. Flowchart

#### 3.6.1. Flowchart Desain dan Simulasi Sistem dengan *Dynamic Voltage Restorer (DVR)*



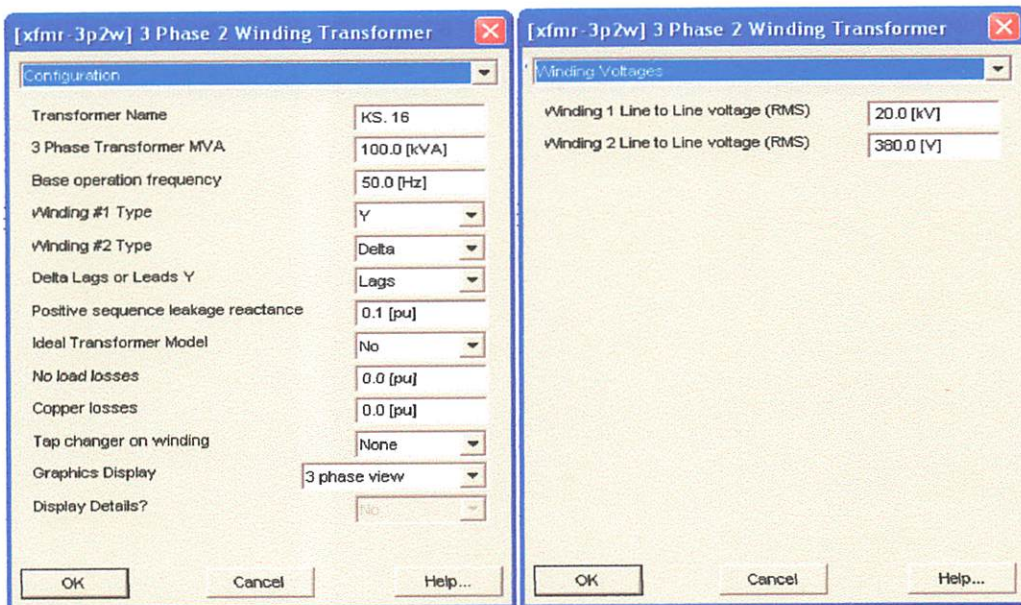
Gambar 5.1. Flowchart Pemecahan Masalah

Gambar 3.11  
Flowchart Analisa Perbaikan Kualitas Daya Dengan (DVR)

### 3.7. Input Data Dalam PSCAD/EMTDC Power Simulation

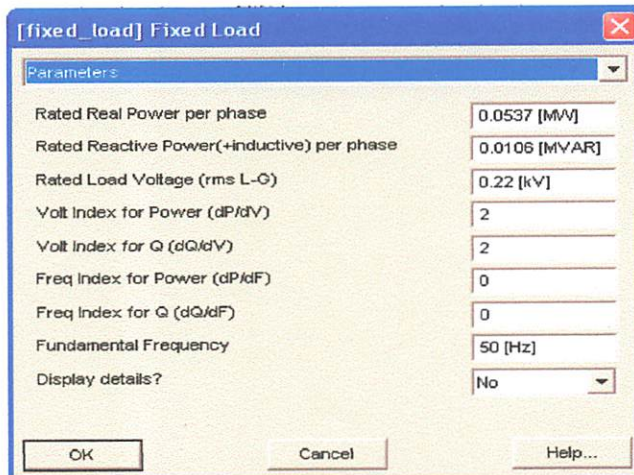
#### 3.7.1. Input Data Transformator dan Fixed Load

##### 1. Data Transformator



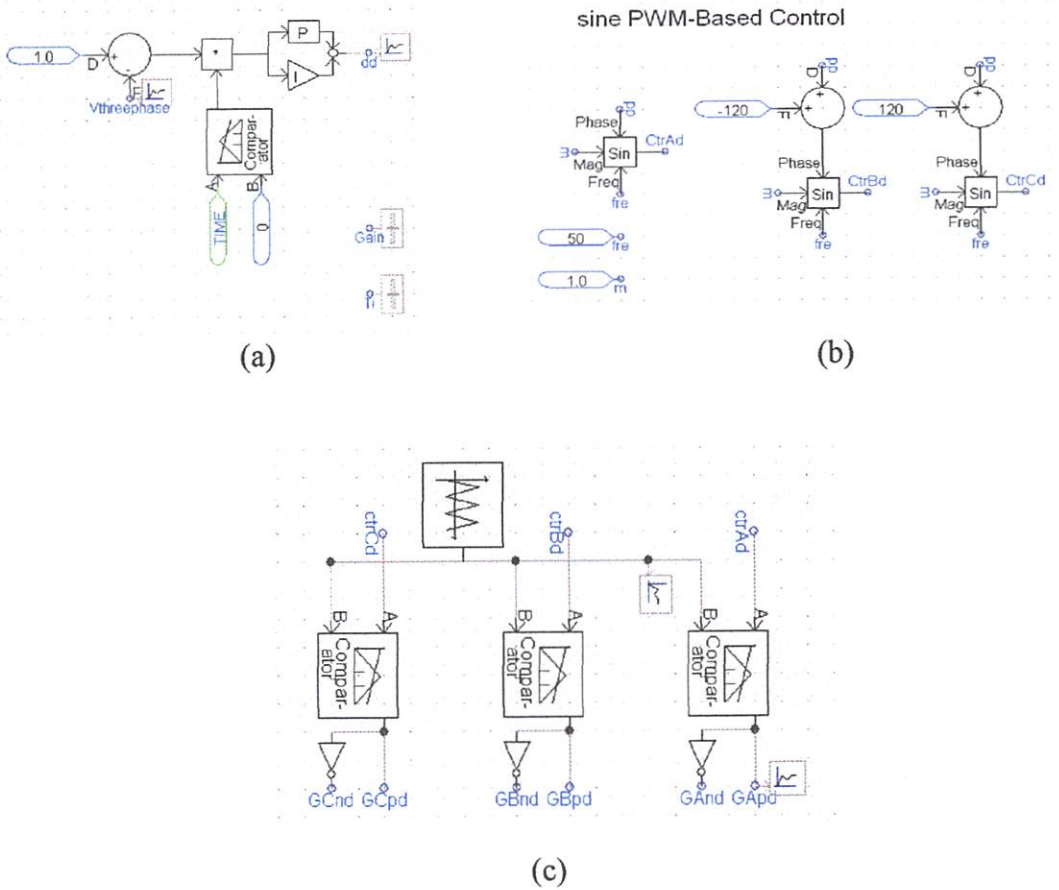
Gambar 3.16  
Tampilan Input Data Transformator

##### 2. Data Fixed Load



Gambar 3.17  
Tampilan Input Data Fixed Load

3.7.2.1. Input Data Pengendali PI dan SPWM pada PSCAD



Gambar 3.18

- (a) Rangkaian Pengendali PI untuk mengendalikan DVR  
 (b) Rangkaian Sinyal Komparator Untuk Mengendalikan DVR  
 (c) Rangkaian Komparator Untuk Mengendalikan DVR

## **BAB IV**

### **SIMULASI DAN ANALISIS**

Setelah pembahasan pada bab awal dari sistem pemulih tegangan yang digunakan diindustri maka untuk memperjelas pembahasan ini akan dilakukan simulasi pemulihan kedip tegangan akibat gangguan hubung singkat. Simulasi kali ini menggunakan software PSCAD/EMTDC V 4.2 Power Simulation.

#### **4.1 Nilai-Nilai Parameter Yang Dipakai Untuk Simulasi**

Dalam simulasi ini dipakai nilai – nilai sebagai berikut:

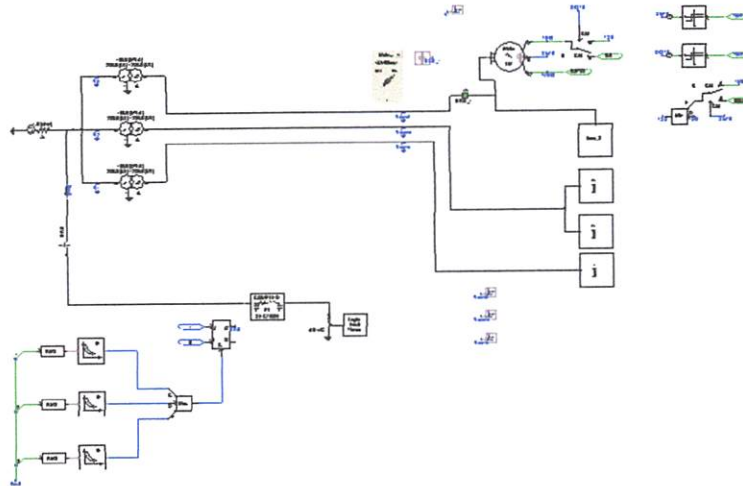
- Tegangan sumber tiga fasa ( $V_s$ ) = 20kV
- Tegangan beban = 0.4kV
- Frekuensi sistem = 50Hz
- Trafo distribusi = 5 MVA; 20/0.4kV
- Beban RLC = 75 kW; 150 VAR
- Tegangan base =
  - 20 kV untuk tegangan menengah
  - 400 V untuk tegangan rendah

#### **4.2 Simulasi dan Analisis Sistem Tanpa DVR**

Untuk simulasi awal, sistem yang digunakan adalah sistem kelistrikan industri tanpa pemulih tegangan *dynamic voltage restorer* (DVR). Pada simulasi ini gangguan akan diterapkan pada sistem kelistrikan industri tersebut sehingga

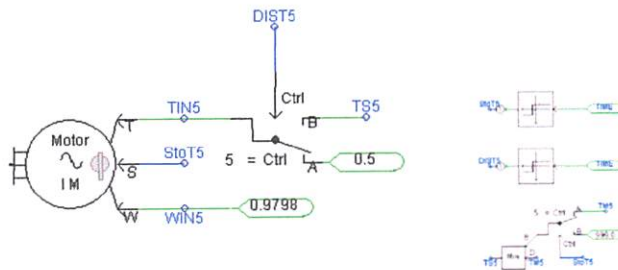
akan didapatkan besarnya kedip tegangan pada pada simulasi pemulihan tegangan.

Rangkaian gambar untuk simulasi sistem tanpa DVR :

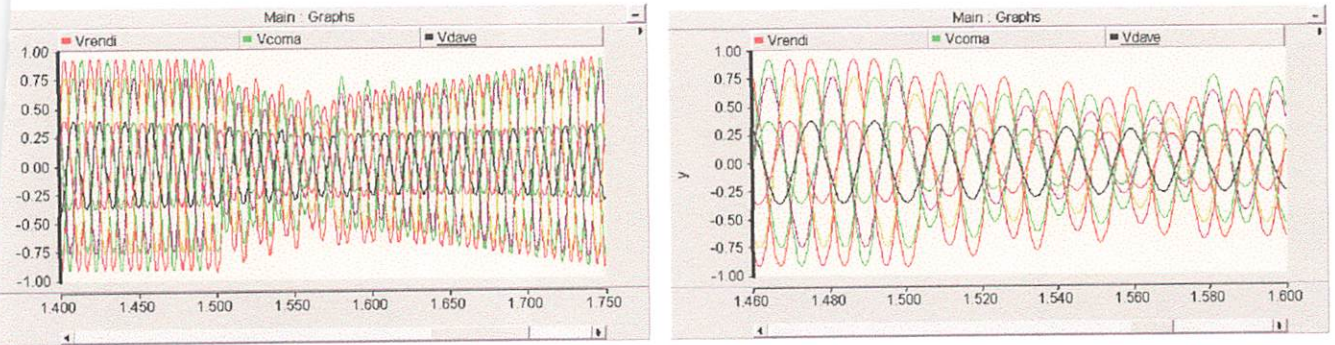


Gambar 4.1. Sistem tanpa Dynamic Voltage Restorer (DVR)

Untuk membuat penurunan tegangan dan pergeseran fasa dalam waktu tertentu, disimulasikan salah satu beban dalam keadaan starting, yaitu pada beban tiga. Dimana beban tiga merupakan motor 3 fasa, sehingga pada beban 1 dan 2 terjadi kedip tegangan.



Gambar 4.2 Rangkaian dari blok sags motor generator



Keterangan : tegangan saluran dalam satuan pu  
 tegangan beban dalam satuan pu

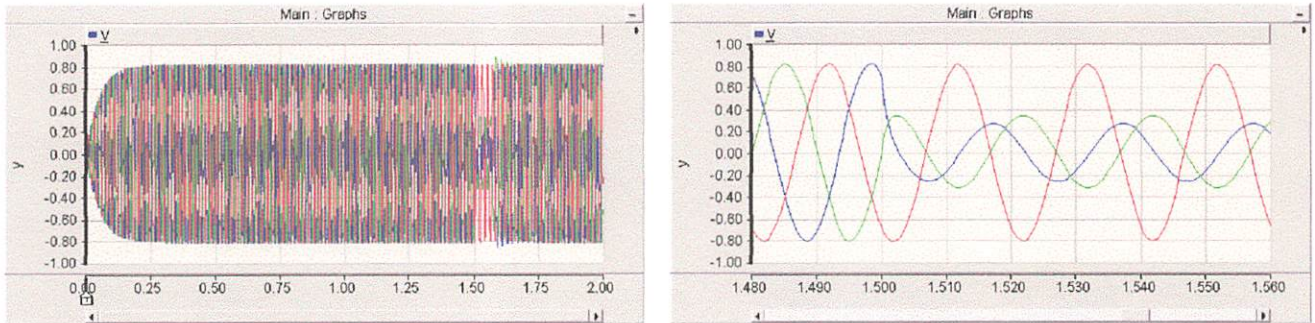
Gambar 4.3 Hasil Dari Simulasi Sistem Tanpa Menggunakan DVR

Dari hasil simulasi tanpa menggunakan DVR dihasilkan tegangan kedip pada beban pertama dan kedua seperti yang telah dijelaskan diatas, bahwa dengan adanya starting motor pada beban ketiga mengakibatkan kedip tegangan secara serempak pada beban 1 dan 2. Disebabkan pada saat starting membutuhkan tegangan yang besar sehingga mempengaruhi tegangan yang ada pada beban 1 dan 2. Hal ini mengakibatkan turunnya tegangan dari harga normal dari tegangan sumber 70 kV

Dengan mengatur timer mengatur waktu on / off dari switch yang menghubungkan sistim ke beban. Periode terjadinya gangguan diatur pada timer ini. Pada simulasi ini diambil 3 cycle, yakni 0.02 – 0.08 detik.



Dari rangkaian Gambar 4.1 diatas maka didapatkan hasil simulasi sebagai berikut:



Keterangan :    tegangan saluran dalam satuan pu  
                      tegangan beban dalam satuan pu

Gambar 4.4 Hasil Dari Simulasi Sistem Tanpa Menggunakan DVR dengan hasil diperbesar

Pada gambar grafik 4.3 hasil simulasi sistem tanpa menggunakan DVR, menunjukkan bahwa terjadi tegangan kedip, dimana terjadi selisih antara tegangan normal dengan jatuh tegangan. Tegangan kedip yang terjadi pada bebn 1 dan 2 penurunan nilai harga tegangan mengalami nilai yang sama, penurunan nilai tersebut bisa dilihat pada grafik diatas. Hal ini terjadi disebabkan adanya hubung singkat 1 fasa ketanah, Dari gambar diatas terlihat bahwa drop tegangan dan pergeseran fasa pada tegangan beban lebih besar dari tegangan saluran, hal ini dikarenakan oleh belitan trafo yang digunakan untuk menyuplai beban memiliki konfigurasi *wye delta*, sehingga tegangan yang terdapat pada beban akan mengalami pergeseran fasa, dan bentuk dari tegangan beban berbeda dengan tegangan saluran.

<b>Phase</b>	<b>Kedip Tegangan (pu)</b>	<b>Phase Jump (°)</b>
<b>A</b>	0,29	40
<b>B</b>	0,38	50
<b>C</b>	0,80	240

Tabel 4.1. Magnitudo kedip tegangan sebelum dipasang DVR

Pada tabel 4.1 bisa diamati besar tegangan kedip dan pergeseran fasa yang terjadi pada simulasi sistem tanpa menggunakan DVR. Gangguan yang terjadi bisa mengakibatkan ketidak maksimalnya kinerja sebuah sistem, dalam hal ini dibidang produksi sangat membutuhkan suplay tegangan yang maksimal guna memperlancar proses produksi.

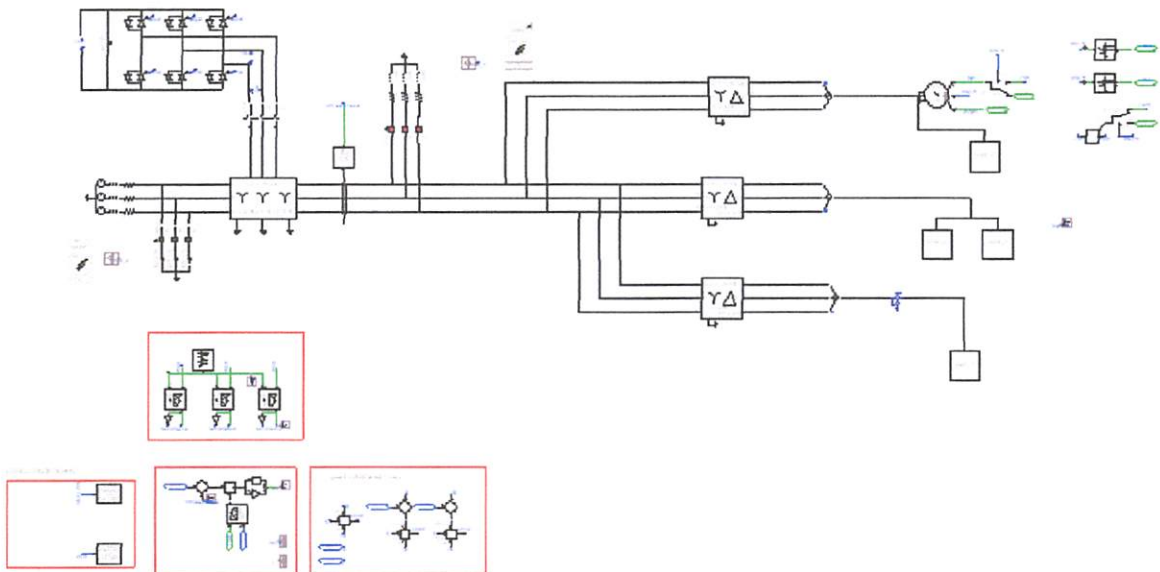
### 4.3 Simulasi dan Analisis Sistem Dengan DVR

Dalam simulasi kali ini akan ditambahkan pemulih tegangan dengan menggunakan DVR pada sistem diatas, sehingga diharapkan pada saat terjadi gangguan kedip tegangan, DVR mampu untuk menginjeksi tegangan sebesar drop tegangan yang timbul. Untuk mengontrol output yang dikeluarkan oleh DVR sehingga mampu menginjeksikan tegangan sesuai dengan nilai jatuhnya atau

gangguan tegangan kedip, maka simulasi ini menggunakan kontrol PI (*Propositional Integral*).

Dalam tahapan ini bagaimana DVR bisa memulihkan kedip tegangan, yang nantinya tegangan bisa maksimal. Dalam kinerjanya sistem yang menggunakan DVR bisa diamati pada gambar 4.4 sehingga dalam tabel hasil simulasi bisa diamati naik turunnya nilai tegangan kedip dan pergeseran fasa yang terjadi sebelum dilakukan pemasangan DVR.

Rangkaian gambar untuk simulasi sistem dengan menggunakan DVR :



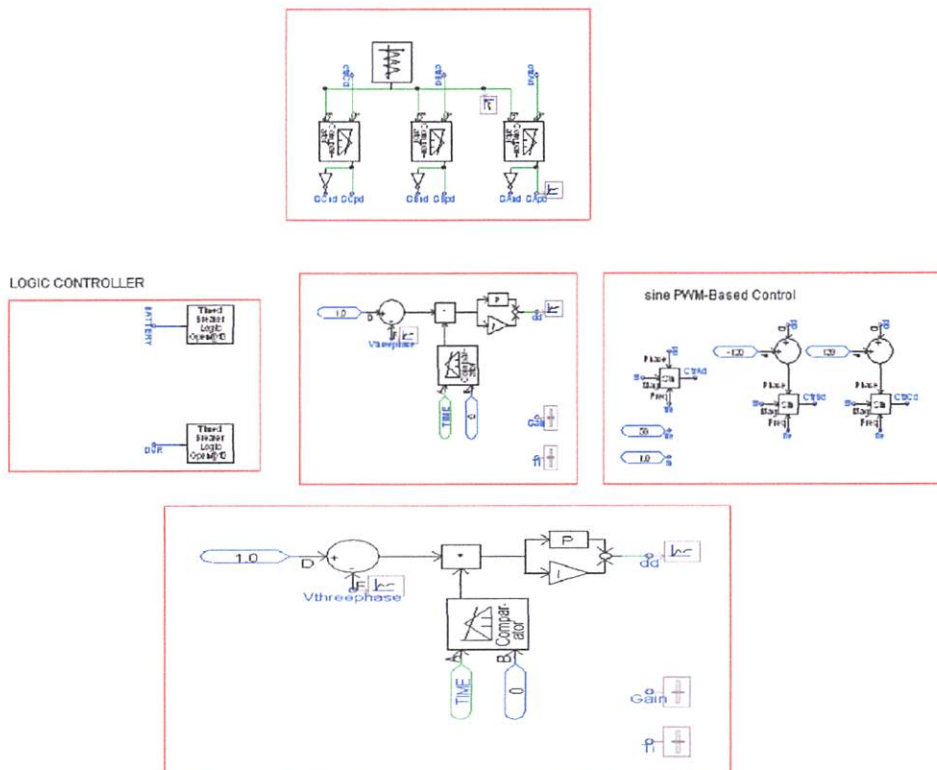
Gambar 4.5. Sistem Dengan Menggunakan Dynamic Voltage Restorer (DVR)

Dari gambar 4.4 *single line* diatas mensimulasikan dengan menggunakan pemasangan DVR pada rangkaian, yang nantinya apakah DVR mampu

menginjeksikan tegangan pada gangguan tegangan kedip yang disebabkan oleh gangguan fasa ketanah.

Pada simulasi tersebut kontrol yang digunakan yaitu PI control yang digunakan mengontrol output yang dikeluarkan oleh DVR sehingga mampu menginjeksikan tegangan sesuai dengan nilai jatuhnya atau gangguan tegangan kedip sehingga tegangan bisa normal kembali.

Pada gambar 4.5 dibawah merupakan control PI yang digunakan dalam sistem rangkaian menggunakan DVR.



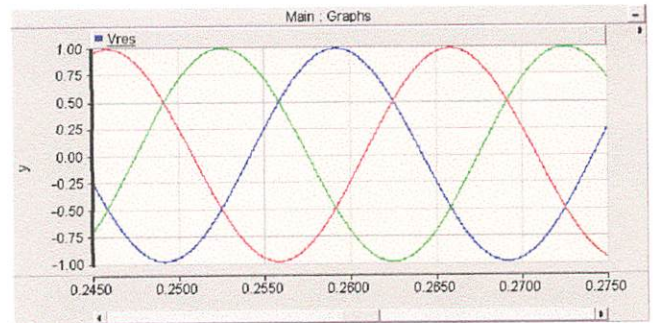
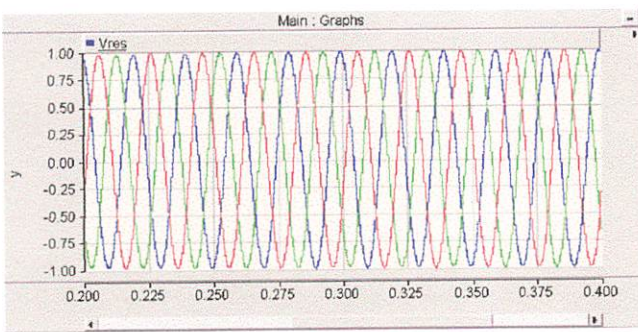
Gambar 4.6. Rangkaian Kontrol Dynamic Voltage Restorer (DVR) Dengan Menggunakan Kontrol PI

Selain yang telah disebutkan diatas tugas komponen kontroler adalah mereduksi sinyal kesalahan, yaitu perbedaan antara sinyal setting dan sinyal

aktual. Hal ini sesuai dengan tujuan sistem kontrol adalah mendapatkan sinyal aktual senantiasa (diinginkan) sama dengan sinyal setting. Semakin cepat reaksi sistem mengikuti sinyal aktual dan semakin kecil kesalahan yang terjadi, semakin baiklah kinerja sistem kontrol yang diterapkan.

Kontroler proposional memiliki keluaran yang sebanding/proposional dengan besarnya sinyal kesalahan (selisih antara besaran yang diinginkan dengan harga aktualnya) [Sharon, 1992, 19]. Secara lebih sederhana dapat dikatakan, bahwa keluaran controller proporsional merupakan perkalian antara konstanta proporsional dengan masukannya.

Dari rangkaian Gambar 4.4 diatas yang menggunakan DVR maka didapatkan hasil simulasi sebagai berikut :



Keterangan :    tegangan saluran dalam satuan pu  
                          tegangan beban dalam satuan pu

Gambar 4.7 Hasil Dari Simulasi Sistem Dengan Menggunakan DVR

<b>Phase</b>	<b>Kedip Tegangan (pu)</b>	<b>Phase Jump (°)</b>
A	1,00	240
B	1,00	240
C	1,00	240

Tabel 4.2. Magnitudo kedip tegangan setelah dipasang DVR

Dari hasil simulasi dengan menggunakan DVR bisa ditunjukkan pada grafik 4.5 dan tabel 4.3, dari penurunan tegangan yang diakibatkan oleh tegangan kedip bisa dipulihkan menjadi 1,00 pu dari 0,80 pu dan pergeseran fasa yang mengakibatkan sudut fasa berubah dari  $120^\circ$  menjadi  $40^\circ - 50^\circ$  yang diakibatkan oleh hubung singkat dan starting beban motor yang berlebih dapat dipulihkan kembali menjadi  $120^\circ$ . Sehingga tegangan kembali normal akibat injeksi tegangan oleh DVR. Hasil selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 4.3.

#### 4.4. Perbandingan Magnitudo Kedip Tegangan Sebelum Dan Setelah Dipasang DVR

Pada simulasi yang telah dilakukan pada rangkaian single line sebelum dan setelah pemasangan DVR, peningkatan atau penurunan gangguan bisa di lihat pada tabel 4.4 dan tabel 4.5 berikut:

Magnitudo Kedip Tegangan Sebelum dipasannng DVR			Magnitudo Kedip Tegangan Sebelum dipasannng DVR		
Phase	Kedip Tegangan (pu)	Phase Jump (°)	Phase	Kedip Tegangan (pu)	Phase Jump (°)
A	0,29	40	A	1,00	240
B	0,38	50	B	1,00	240
C	0,80	240	C	1,00	240

Tabel 4.3. Magnitudo kedip tegangan sebelum dan setelah pemasangan DVR

Dari simulasi yang telah dilakukan menggunakan softwear PS CAD ternyata DVR mampu memulihkan tegangan yang turun akibat starting motor yang berlebih, terutama gangguan tegangan kedip dan pergeseran sudut fasa. Sehingga didapatkan nilai yang sebenarnya sesuai dengan tegangan sumber yang telah disalurkan pada beban, perbandingan dari sebelum dan setelah perbaikan tegangan kedip dan pergeseran fasa bisa diamati dari hasil grafik dan tabel diatas.

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5. Kesimpulan**

Dari sebagaimana yang telah diuraikan di atas, dapat ditarik kesimpulan bahwa, simulasi menunjukkan Dynamic Voltage Restorer (DVR) dapat memulihkan tegangan dengan pergeran fasa yang diakibatkan gangguan sudut fasa ke tanah. Pada hasil simulasi juga bisa diamati perbedaan antara sebelum dan setelah pemasangan DVR dilakukan, bahwa terjadi tegangan kedip dan pergeseran fasa, namun setelah pemasangan DVR tegangan bisa dipulihkan sesuai dengan tegangan sumber.

Dari simulasi tabel analisa menunjukkan bahwa ada perubahan tegangan setelah dan sebelum :

1. Pada fase a setelah motor mengalami starting tegangan kedip mencapai 0,29 pu, setelah dipasang DVR tegangan menjadi 1,00 pu.
2. Pada fase b setelah motor mengalami starting tegangan kedip mencapai 0,38 pu, setelah dipasang DVR tegangan menjadi 1,00 pu.
3. Pada fase a setelah motor mengalami starting tegangan kedip mencapai 0,80 pu, setelah dipasang DVR tegangan menjadi 1,00 pu.

Begitu juga dengan pergeseran sudut fasa yang diakibatkan oleh tegangan kedip yang mempengaruhi kualitas tegangan normal, bisa dipulihkan setelah sistem menggunakan DVR.



## 6. Saran

Sangat diharapkan dengan dilakukan studi pemakaian DVR didalam pemulihan kedip tegangan, nantinya ada yang mengembangkan sebuah metode baru sehingga DVR selain mampu mengompensasi tegangan urutan positif, dan urutan negatif tetapi juga mampu mengompensasi urutan nol. Disamping itu diharapkan juga pada penelitian berikutnya metode penentuan parameter dari *flc* menggunakan metode lain seperti menggunakan tuning genetik algoritma dsb.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1]. IEEE Std. 1159-1995, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. IEEE, November 1995.
- [2]. Imanda Ferli, Margo Pujiantara, Mochamad Ashari, “*Pemodelan Dynamic Voltage Restorer (DVR) untuk Mengatasi Kedip Tegangan Balance dan Unbalance*”, Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS, 2005.
- [3]. J. G. Nielsen, F. Blaabjerg and N. Mohan, “Control Strategies for Dynamic Voltage Restorer Compensating Voltage Sags with Phase Jump”, *Proc. APEC 2001*, Vol. 2, pp. 1267-1273.
- [4]. Rashid Muhammad H, “*Power Electronics Circuit, Devices, and Application*”, Prentice Hall, 1993.
- [5]. R.C. Dugan, M.F. McGranaghan , and H.W. Beatys, *Electrical Power System Quality*. McGraw-Hill, 1996.
- [6]. S. Middlekauff and E. Collins, “System and Customer Impact” . *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 13, No. 1:pp. 278-282, January 1998.
- [7]. T. Jauch, Kara A., Rahmani M., and Westermann D. “Power Quality Ensured by Dynamic Voltage Correction”, *ABB Review*, Vol. 4:pp. 25-36, 1998.



## FORMULIR BIMBINGAN SKRIPSI

Nama : Pieter Adji Hadi P  
Nim : 02.12.014  
Masa Bimbingan : 11 September 2009 – 22 Februari 2010  
Judul Skripsi : ANALISA PERBAIKAN KWALITAS TEGANGAN  
AKIBAT TEGANGAN SAG DAN PHASE JUMP  
MENGUNAKAN KOMPENSASI DYNAMIC VOLTAGE  
RESTORE (DVR) PADA INDUSTRI TEKSTIL PT. COATS  
REJO INDONESIA

No.	Tanggal	Uraian	Paraf Pembimbing
1.	12 November	Konsultasi Bab 1 dan 2 Rumusan Masalah dan Rumus Tegangan Kedip	
2.	15 November	Konsultasi Bab 3 Tentang Dynamic Voltage Restore (DVR)	
3.	20 November	Konsultasi Bab 3 Penambahan Analisa dan Reverensi	
4.	25 November	Konsultasi Bab 4 Gambar Jaringan Instalasi Di Industri Pada PS CAD dan Pemasangan DVR	
5.	26 November	Konsultasi Bab 4 Hasil Sebelum dan Sesudah Pemasangan DVR dan Gambar Grafik	
6.	27 November	Konsultasi Bab 5	
7.			

Malang, Oktober 2009  
Dosen Pembimbing

**Ir. Yusuf Ismail Nakhoda, MT**  
NIP.Y. 1018800189

Form S-4b



INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO S-1

## PERSETUJUAN PERBAIKAN SKRIPSI

Dari hasil ujian skripsi Jurusan Teknik Elektro jenjang Strata satu (S-1) yang diselenggarakan pada :

Hari : Selasa  
Tanggal : 6 Oktober 2009

Telah dilakukan skripsi oleh :

1. Nama : Pieter Adji H.P
2. NIM : 02.12.014
3. Jurusan : Teknik Elektro
4. Konsentrasi : Teknik Energi Listrik
5. Judul Skripsi : Analisa Perbaikan Kualitas Tegangan Akibat Tegangan Sag dan Phase Jump menggunakan Kompensasi Dynamic Voltage Restore (DVR) Pada Industri Tekstil PT. Coats Rejo Indonesia

Perbaikan meliputi :

No.	Materi Perbaikan	Keterangan
1.	Abstraksi diperbaiki	
2.	Data disempurnakan	
3.	Kesimpulan diperbaiki	
4.	Data inputan?	
5.	Tabel hasil analisa?	

**Penguji Pertama**

**Ir. H. Choirul Saleh, MT**  
NIP.Y. 101 8800 190

**Penguji Kedua**

**Bambang Prio. H, MT**  
NIP. 102 8400 082

**Dosen Pembimbing**

**Ir. Yusuf Ismail Nakhoda, MT**  
NIP.Y. 101 88 00189



INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO S-1

---

BERITA ACARA UJIAN SKRIPSI  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI

Nama Mahasiswa : Pieter Adji Hadi P  
N.I.M : 02.12.014  
Jurusan : Tenik Elektro S-1  
Konsentrasi : Teknik Energi Listrik  
Judul Skripsi : ANALISA PERBAIKAN KWALITA  
TEGANGAN AKIBAT TEGANGAN KEDIP  
DAN PHASE JUMP MENGGUNAKAN  
KOMPENSASI *DYNAMIC VOLTAGE*  
*RESTORE* (DVR) PADA INDUSTRI  
TEKSTIL PT.COATS REJO INDONESIA

Dipertahankan dihadapan Majelis Penguji Skripsi Jenjang Strata Satu (S-1)

Hari : Selasa  
Tanggal : 6 Oktober 2009  
Dengan Nilai : 81,85 (A) *af*

**Panitia Ujian Skripsi**

**Ketua Majelis Penguji**

**(Ir.Sidik Noertjahjono, MT)**  
NIP.Y. 102 8700 163

**Sekretaris Majelis Penguji**

**(Ir. F. Yudi Limpraptono, MT)**  
NIP.Y. 103 9500 274

**Anggota Penguji**

**Penguji Pertama**

**Ir. H. Choirul Saleh, MT**  
NIP.Y. 101 8800 190

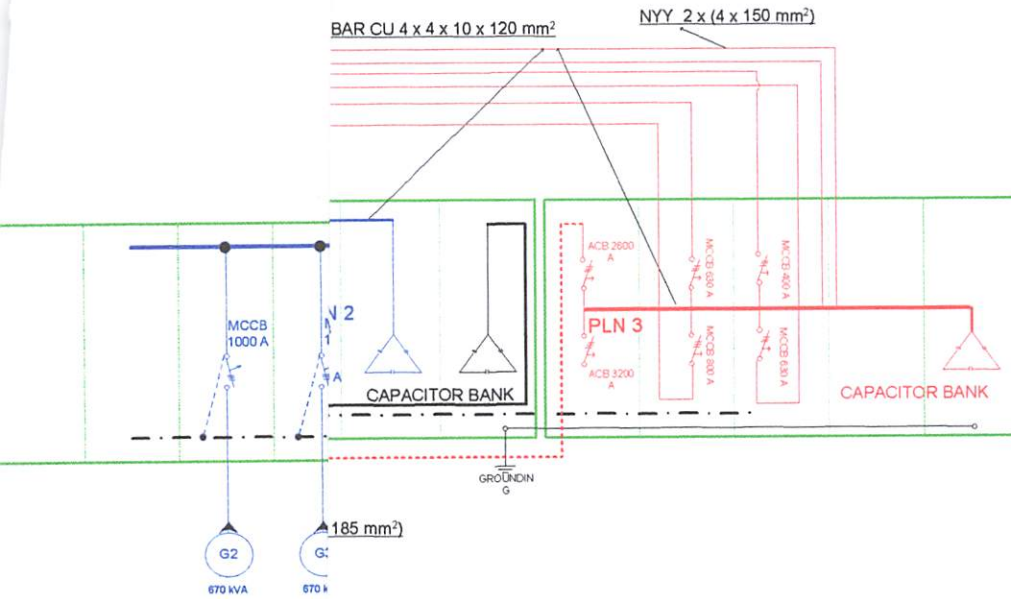
**Penguji Kedua**

**Bambang Prio. H, MT**  
NIP. 102 8400 082

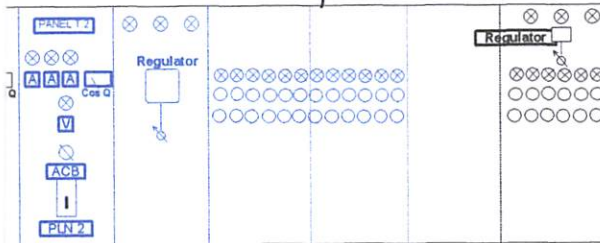
# ***LAMPIRAN***

**SINGLE LINE DIAGRAM DISTRIBUSI LISTRIK  
DAN  
DATA PENGUKURAN BEBAN PABRIK TEKSTIL  
PT. COATS REJO INDONESIA, PASURUAN - JAWA TIMUR**

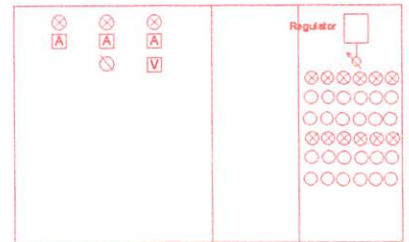
# ELECTRIC DISTRIBUTION



MDP T1, MDP T2 & CAPACITOR BANK (OLD - MODIFICATED)



MDPT.3 & CAPACITOR BANK (NEW)



Penyulang Utama IMAM BONJOL

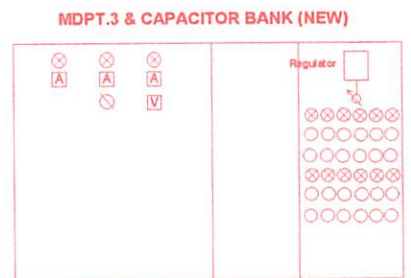
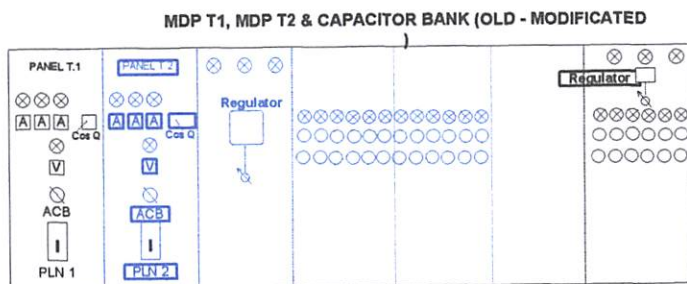
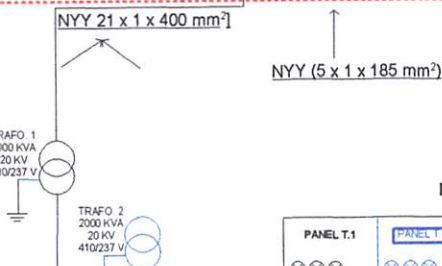
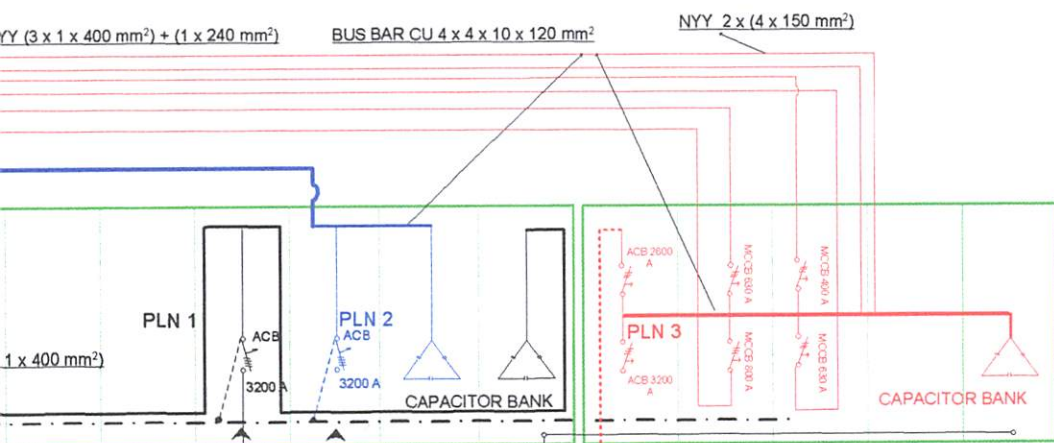
Penyulang Cadangan TUMENGGUNGAN

**REMARKS :**

- BLUE LINES** : Trafo 2
- BLACK LINES** : Trafo 1
- RED LINES** : New Trafo

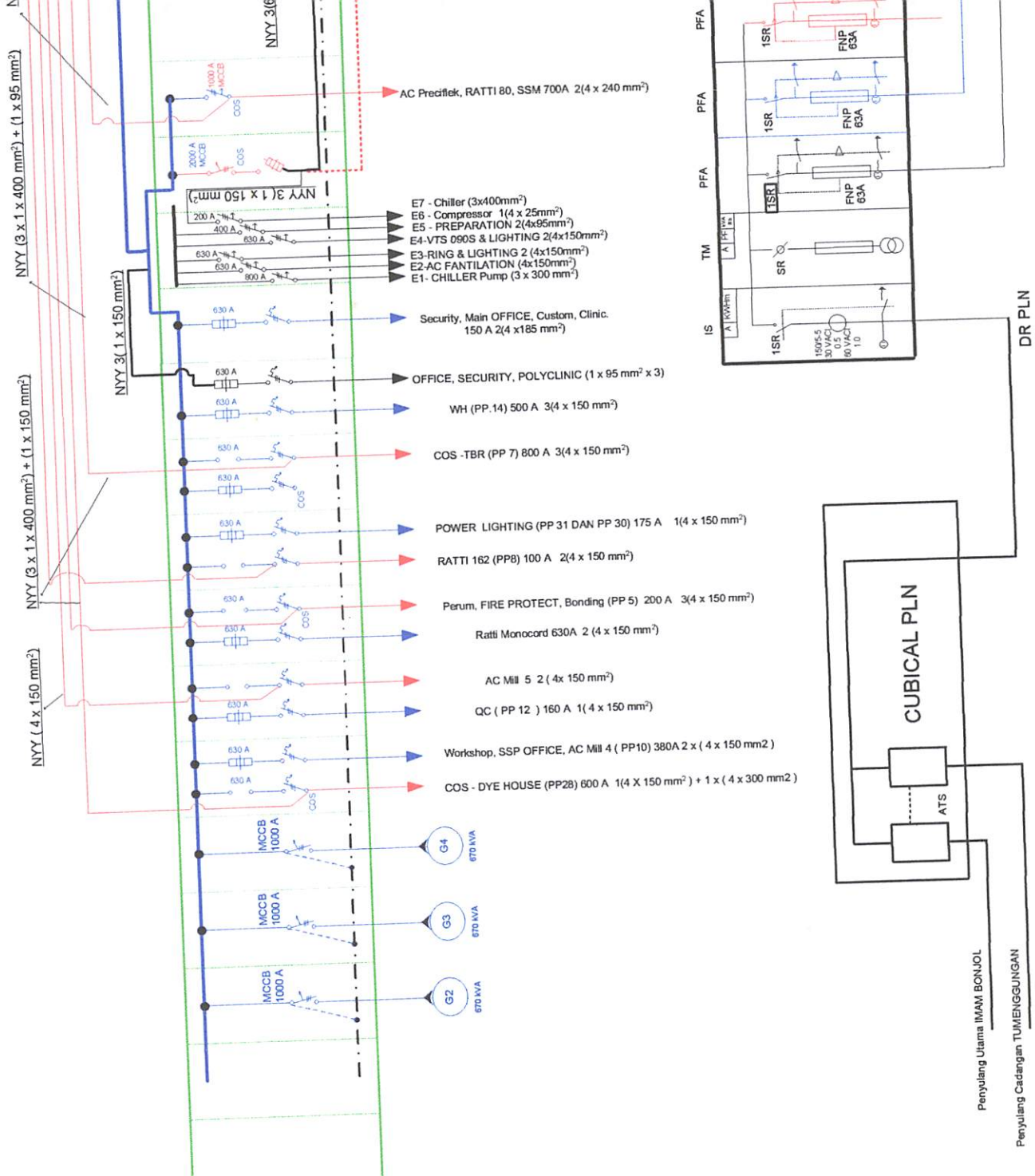


# IN PANEL ELECTRIC DISTRIBUTION



**REMARKS :**  
 BLUE LINES : Trafo 2  
 BLACK LINES : Trafo 1  
 RED LINES : New Trafo

# SINGLE LINE DIAGRAM OF MAIN



Machine	Q'ty	KW Plate / MC	Total KW MC
Compressor GA 11	1	11.00	11.00
Compressor GA 22	1	22.00	22.00
Lighting Mill II	1	10.00	10.00
Ware House	1	25.00	25.00
Ratti Monocord	4	15.00	60.00
CLV	2	4.00	8.00
Ratti 2nd	7	22.00	154.00
SSP Office+ac mill 4	1	130.00	130.00
QA	1	20.00	20.00
General lighting + Office	1	80.00	80.00
Mill I Lighting	1	15.70	15.70
Mill III Lighting	1	20.00	20.00
Mill IV Lighting	1	18.60	18.60
Mill V Lighting	1	29.40	29.40
Finishing Lighting	1	18.50	18.50
Wet Processing Lighting	1	13.41	13.41
Adi Abatic System	1	229.00	229.00
TBR Machine	14	46.00	644.00
SLV	3	4.50	13.50
CLV	3	4.00	12.00
Ratti 1st 96 Spdl	8	22.00	176.00
Ratti 1st 80 Spdl	2	17.00	34.00
Ratti 2nd 96 Spdl	5	22.00	110.00
Ratti 2nd 76 Spdl	5	15.00	75.00
SSM PW1-F 24 Spdl	1	18.00	18.00
SSM PW1-F 18 Spdl	2	13.50	27.00
SSM PW1-F 30 Spdl	2	22.50	45.00
AC Installation + Chiller ex Murata	1	35.00	35.00
<b>TOTAL BEBAN TERPASANG</b>			<b>2,054.11 KW</b>

**ACTUAL RUNNING SEKARANG**

421.90 KW

51.59 KVARL

R 618.4 Ampere

S 646.2 Ampere

T 596.5 Ampere

0.98 Cos Q

## Power Quality Improvement Using DVR

C. Benachaiba and B. Ferdi  
Bechar University, Center BP, 417 Bechar 08000, Algeria

**Abstract:** Voltage sags and swells in the medium and low voltage distribution grid are considered to be the most frequent type of power quality problems based on recent power quality studies. Their impact on sensitive loads is severe. The impact ranges from load disruptions to substantial economic losses up to millions of dollars. Different solutions have been developed to protect sensitive loads against such disturbances but the DVR is considered to be the most efficient and effective solution. Its appeal includes lower cost, smaller size and its dynamic response to the disturbance. This research described DVR principles and voltage restoration methods for balanced and/or unbalanced voltage sags and swells in a distribution system. Simulation results were presented to illustrate and understand the performances of DVR under voltage sags/swells conditions.

**Key words:** Dynamic Voltage Restorer (DVR), voltage sags, voltage swells, power quality

### INTRODUCTION

Dynamic voltage restores (DVRs) are now becoming more established in industry to reduce the impact of voltage dips on sensitive loads<sup>[1-3]</sup>. A voltage dip is commonly defined as any low voltage drop event between 10% and 90% of the nominal RMS voltage, lasting between 0.5 cycles and 1 min<sup>[4]</sup>. In comparison with interruptions, voltage dips affect a large number of customers and for some cases may cause extremely serious problems. Voltage dips are one of the most occurring power quality problems. They occur more often and cause severe problems and economical losses. There are different ways to mitigate voltage dips, swells and interruptions in transmission and distribution systems. At present, a wide range of very flexible controllers which capitalize on newly available power electronics components are emerging for custom power applications. Among these, the distribution static compensator and the dynamic voltage restorer are the most effective devices; both of them based on the voltage source converter (SVC) principle<sup>[5]</sup>.

Figure 1 shows a typical DVR series connected topology. The DVR essentially consists of a series inverter (VSI), inverter output filter and an energy storage device connected to the DC link.

The basic operation principle of the DVR is to inject an appropriate voltage in series with the supply through injection transformer whenever voltage sag or voltage swell is detected. In addition to voltage sags and swells compensation, DVR can also perform other

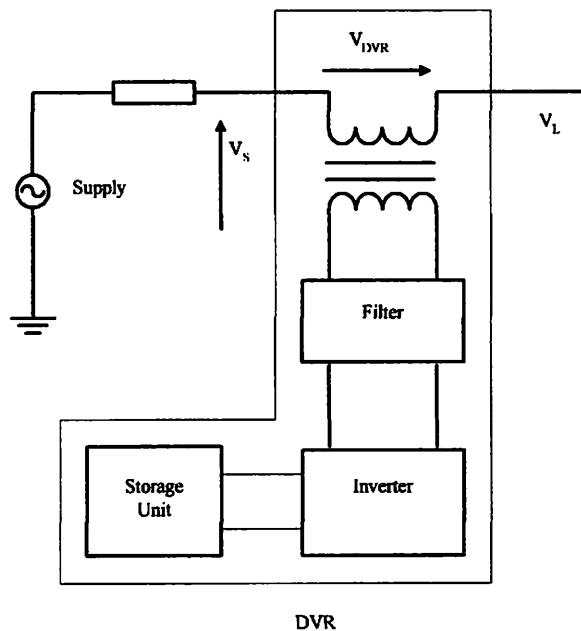


Fig. 1: DVR series connected topology

tasks such as harmonic compensation and Power Factor correction. Compared to the other Custom Power devices, the DVR clearly provides the best economic solution for its size and capabilities.

This research introduced Dynamic Voltage Restorer (DVR) and its voltage compensation methods. At the end, simulation results using MATLAB were illustrated and discussed.

### DYNAMIC VOLTAGE RESTORER

A Dynamic Voltage Restorer (DVR) is a recently proposed series connected solid state device that injects voltage into the system in order to regulate the load side voltage. The DVR was first installed in 1996<sup>[6]</sup>. It is normally installed in a distribution system between the supply and the critical load feeder<sup>[7]</sup>. Its primary function is to rapidly boost up the load-side voltage in the event of a disturbance in order to avoid any power disruption to that load<sup>[8,9]</sup>. There are various circuit topologies and control schemes that can be used to implement a DVR. In addition to voltage sags and swells compensation, DVR can also perform other tasks such as: line voltage harmonics compensation, reduction of transients in voltage and fault current limitations.

The general configuration of the DVR consists of an Injection/Booster transformer, a Harmonic filter, a Voltage Source Converter (VSC), DC charging circuit and a Control and Protection system as shown in Fig. 1.

### CONVENTIONAL DVR VOLTAGE INJECTION METHODS

The possibility of compensating voltage sag can be limited by a number of factors including finite DVR power rating, different load conditions and different types of voltage sag. Some loads are very sensitive to phase angle jump and others are tolerant to it. Therefore, the control strategy depends on the type of load characteristics. There are three distinguishing methods to inject DVR compensating voltage:

**Pre-Dip Compensation (PDC):** The PDC method tracks supply voltage continuously and compensates load voltage during fault to pre-fault condition. In this method, the load voltage can be restored ideally, but the injected active power cannot be controlled and it is determined by external conditions such as the type of faults and load conditions. The lack of the negative sequence detection in this method leads to the phase-oscillation in the case of single-line faults. Figure 2 shows the single-phase vector diagram of this method.

According to Fig. 2, the apparent power of DVR is:

$$S_{IDVR} = I_L V_{IDVR} = I_L \sqrt{V_L^2 + V_s^2 - 2V_L V_s \cos(\theta_L - \theta_s)}$$

And the active power of DVR is:

$$P_{IDVR} = I_L (V_L \cos \theta_L - V_s \cos \theta_s)$$

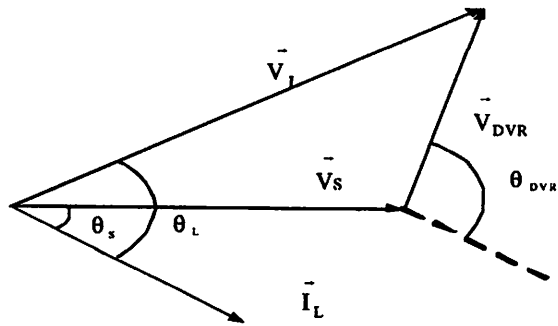


Fig. 2: Single-phase vector diagram of the PDC method

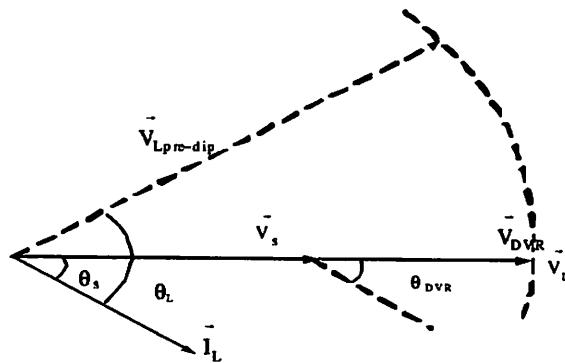


Fig. 3: Single-phase vector diagram of the IPC method

The magnitude and the angle of the DVR voltage are:

$$V_{IDVR} = \sqrt{V_L^2 + V_s^2 - 2V_L V_s \cos(\theta_L - \theta_s)}$$

$$\theta_{IDVR} = \tan^{-1} \left( \frac{V_L \sin \theta_L - V_s \sin \theta_s}{V_L \cos \theta_L - V_s \cos \theta_s} \right)$$

**In-Phase Compensation (IPC):** This is the most used method in which the injected DVR voltage is in phase with the supply side voltage regardless of the load current and the pre-fault voltage as shown in Fig. 3. The IPC method is suitable for minimum voltage or minimum energy operation strategies<sup>[10]</sup>. In other word, this approach requires large amounts of real power to mitigate the voltage sag, which means a large energy storage device.

The apparent and active powers of DVR are:

$$S_{2DVR} = I_L V_{DVR} = I_L (V_L - V_s)$$

$$P_{2DVR} = I_L V_{DVR} \cos \theta_s = I_L (V_L - V_s) \cos \theta_s$$

The magnitude and the angle of the DVR voltage are:

$$V_{2DVR} = V_L - V_S$$

$$\theta_{2DVR} = \theta_S$$

**In-Phase Advance Compensation (IPAC):** Pre-Dip and in-phase compensation method must inject active power to loads to correct voltage disturbance. However, the amount of possible injection active power is confined to the stored energy in DC link, which is one of the most expensive components in DVR. Due to the limit of energy storage capacity of DC link, the DVR restoration time and performance are confined in these methods.

For the sake of controlling injection energy, in phase advance compensation method was proposed. The injection active power is made zero by means of having the injection voltage phasor perpendicular to the load current phasor. This method can reduce the consumption of energy stored in DC link by injecting reactive power instead of active power. Reducing energy consumption means that ride-through ability is increased when the energy storage capacity is fixed. On the other hand, the injection voltage magnitude of in-phase advance compensation method is larger than those of pre-dip or in-phase compensation methods and the voltage phase shift can cause voltage waveform discontinuity, inaccurate zero crossing and load power swing. Therefore, in phase advance compensation method should be adjusted to the load that is tolerant to phase angle jump, or transition period should be taken while phase angle is moved from pre-fault angle to advance angle.

In short, IPAC method uses only reactive power and unfortunately, not all the sags can be mitigated without real power, as a consequence, this method is only suitable for a limited range of sags.

**SIMULATION**

In order to show the performance of the DVR in voltage sags and swells mitigation, a simple distribution network was simulated using MATLAB (Fig. 1). A DVR was connected to the system through a series transformer with a capability to insert a maximum voltage of 50% of the phase to ground system nominal voltage. In this simulation the In-Phase Compensation (IPC) method was used. The load considered in the study is a 5.5 MVA capacity with 0.92 p.f, lagging.

**Voltage sags:** A case of Three-phase voltage sag was simulated and the results are shown in Fig. 4. Figure 4a

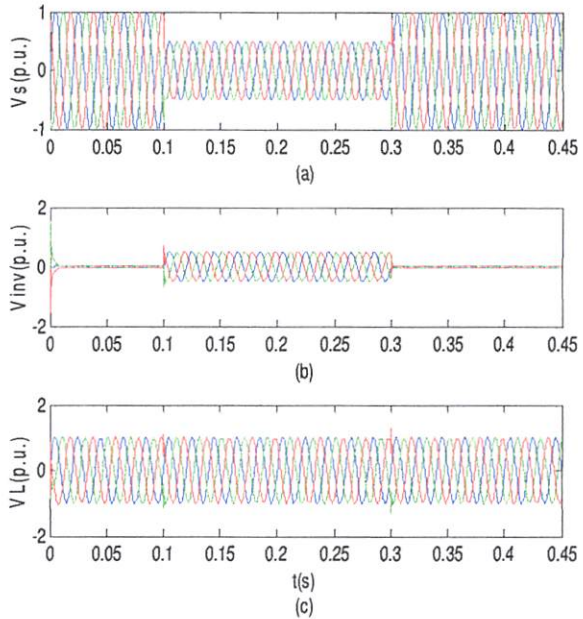


Fig. 4: Three-phase voltage sag; (a): Source voltages, (b): Injected voltages; (c): Load voltages

shows a 50% voltage sag initiated at 100 ms and it is kept until 300 ms, with total voltage sag duration of 200 ms. Figure 4b and c show the voltage injected by the DVR and the compensated load voltage, respectively. As a result of DVR, the load voltage is kept at 1 p.u. throughout the simulation, including the voltage sag period. Observe that during normal operation, the DVR is doing nothing. It quickly injects necessary voltage components to smooth the load voltage upon detecting voltage sag.

In order to understand the performance of the DVR under unbalanced conditions, Single-phase voltage sag was simulated and the results are shown in Fig. 5. The supply voltage with one phase voltage dropped down to 50% is shown in Fig. 5a. The DVR injected voltage and the load voltage are shown in Fig. 5b and c, respectively. As can be seen from the results, the DVR was able to produce the required voltage component rapidly and helped to maintain a balanced and constant load voltage at 1.00 p.u.

**Voltage swells:** The performance of DVR for a voltage swell condition was investigated. Here, the supply voltage swell was generated as shown in Fig. 6a. The supply three-phase voltage amplitudes were increased about 125% of nominal voltage. The injected three-phase voltage that was produced by DVR in order to correct the load voltage and the load voltage are shown in Fig. 6b and c, respectively. As can be seen from the

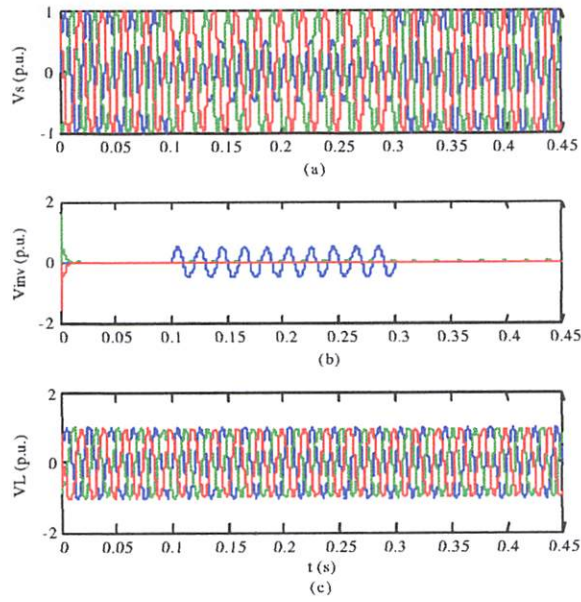


Fig. 5: Single-phase voltage sag; (a): Source voltages; (b): Injected voltage, (c): Load voltages

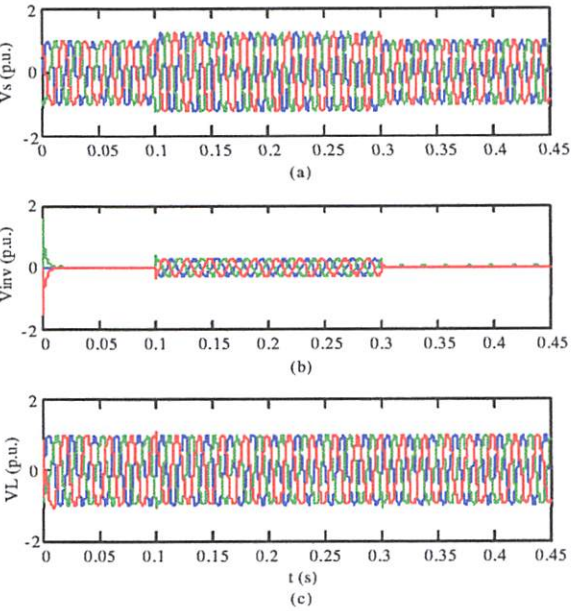


Fig. 6: Three-phase voltage swell; (a): Source voltages; (b): Injected voltages; (c): Load voltages

results, the load voltage was kept at the nominal value with the help of the DVR. Similar to the case of voltage sag, the DVR reacted quickly to inject the appropriate voltage component (negative voltage magnitude) to correct the supply voltage.

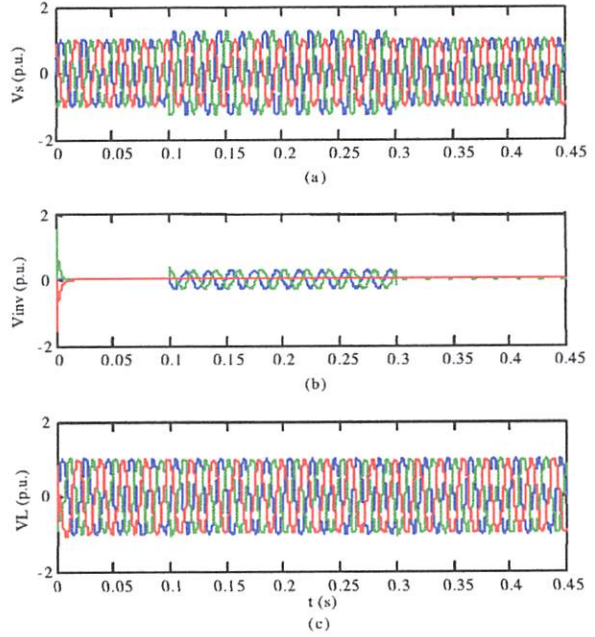


Fig. 7: Two-phase voltage swell; (a): Source voltages; (b): Injected voltages; (c): Load voltages

The performance of the DVR with an unbalanced voltage swell is shown in Fig. 7. In this case, two of the three phases are higher by 25% than the third phase as shown in Fig. 7a. The injected voltage that was produced by DVR in order to correct the load voltage and the load voltage are shown in Fig. 7b and c, respectively. Notice the constant and balanced voltage at the load throughout the simulation, including during the unbalanced voltage swell event.

### CONCLUSION

The simulation results showed clearly the performance of the DVR in mitigating voltage sags and swells. The DVR handled both balanced and unbalanced situations without any difficulties and injected the appropriate voltage component to correct rapidly any anomaly in the supply voltage to keep the load voltage balanced and constant at the nominal value. The efficiency and the effectiveness in voltage sags/swells compensation showed by the DVR makes him an interesting power quality device compared to other custom power devices.

### REFERENCES

1. Ravi Kumar, S.V. and S. Siva Nagaraju, 2007. Power quality improvement using d-statcom and DVR. Int. J. Elect. Power Eng., 1: 368-376.

2. Nielsen, J.G., 2002. Design and control of a dynamic voltage restorer. Ph. D. Thesis, Aalborg University, Institute of Energy Technology. ISBN: 87-89179-42-0.
3. John Newman, M., D. Grahame Holmes, J. Godsk Nielsen and F. Blaabjerg, 2003. A Dynamic Voltage Restorer (DVR) with selective harmonic compensation at medium voltage level. IEEE.
4. Moreno-Muñoz, A., D. Oterino, M. González and F.A. Olivencia, 2006. Study of Sag Compensation with DVR: Benalmádena (Málaga), Spain. IEEE MELECON May, pp: 16-19.
5. Stump, M.D., G.J. Kaene and F.K.S. Leong, 1998. Role of custom power products in enhancing power quality at industrial facilities. In: Conf. Rec. IEEE/EMPD, pp: 507-517.
6. Li, B.H., S.S. Choi and D.M. Vilathgamuwa, 2001. Design considerations on the line-side filter used in the dynamic voltage restorer: IEE Proc. Generat. Transmission Distribut., 148: 1-7.
7. Chan, K., 1998. Technical and performance aspects of a dynamic voltage restorer. In IEE Half Day Colloquium on Dynamic Voltage Restorers-Replacing Those Missing Cycles, pp: 5/1-525.
8. Buxton, R., 1998. Protection from voltage dips with the dynamic voltage restorer. In IEE Half Day Colloquium on Dynamic Voltage Restorers-Replacing Those Missing Cycles, pp: 3/1-3/6.
9. Sng, E.K.K., S.S. Choi and D.M. Vilathga-Muwa, 2004. Analysis of series compensation and DC-link voltage controls of a transformerless self-charging dynamic voltage restorer. IEEE Trans. Power Delivery, 19: 1511-1518.
10. E-Otadui, U. Viscarret, S. Bacha, M. Caballero and R. Rezero, 2002. Evaluation of different strategies for series voltage sag compensation. Proc. IEEE PESC, 4: 1797-1802.



# IMPACT OF VOLTAGE SAG IN MEA'S DISTRIBUTION NETWORK

Tanit Meananeatra<sup>1</sup>, Naris Chatthanont<sup>2</sup>, Suraphol Wanchana<sup>3</sup>

*Better Care and Power Quality Department*

*Metropolitan Electricity authority (MEA)*

*Bangkok, Thailand*

<sup>1</sup>tanit.m@mea.or.th

<sup>2</sup>naris.pcd@mea.or.th

<sup>3</sup>surapol.w@mea.or.th

**Abstract**— Voltage sag are momentary reduce in voltage caused by short-circuits, overloads, and starting of large motors, that effecting to the customers' sensitive loads such as adjustable Speed Drive (ASD), Programmable Logic Control (PLC) to tripped and are recognized as the most important power quality (PQ) problems, The scope of works presented in this papers is to evaluate the voltage sag performance from MEA's distribution network (Bang - Pu Industrial Estate) and effects of faults.

The overall methodology proposed utilizes the standard software packages of load flow analysis and short circuit studies and interfaced module developed specially for this problem. Methodology for sag analysis includes the voltage sag characterized, like magnitude, duration and area of vulnerability MEA's distribution network (Bang - Pu Industrial Estate).

**Keywords** : Voltage Sag, Voltage Dip, Sag Analysis, Power Quality, Power System Analysis

**Contact** : Tanit Meananeatra\*, Better Care and Power Quality Department, Metropolitan Electricity Authority, Metropolitan Electricity Authority Thonburi District 132/18 Naransanitwong Road , Bangkoknoi, Bangkok 10700, Thailand, Email : [tanit.m@mea.or.th]

## I. INTRODUCTION

A voltage sag is a sudden short duration drop of the root mean square (rms) voltage, followed by a recovery within 1 minute, caused by short-circuits, overloads, and starting of large motors. Power quality is the most serious problem in industrial Estate. It causes sensitive equipments such as production control unit tripped, thus affecting customers' production capacity. Voltage sag is thus much more of a "global" problem than an interruption. Reducing the numbers of voltage sags requires improvements on several feeders.

The voltage sag performance of a distribution network can be predicted by monitoring. However, the period needed to achieve a reasonable accuracy is too long. Simulation can use as an alternative tool to predict this performance. The overall methodology proposed utilizes the standard software packages of load flow analysis short circuit studies and interfaced module developed specially for this problem. Methodology for sag analysis includes the voltage sag characterized, like

magnitude, duration and area of vulnerability of MEA's distribution network (Bang - Pu Industrial Estate).

## II. POWER QUALITY PROBLEM IN MEA'S DISTRIBUTION NETWORK

### A. Background

Voltage sags or voltage dips are momentary reduce in voltage with a magnitude 0.9 p.u. or below and duration between half cycle to 1 minute are probably the most important power quality problems affecting customers in industrial estate. These events are usually associated with a short - circuit or fault somewhere on one - feeder tends to cause voltage drops on all another feeders in supply area. Even voltage sags lasting only 4-5 cycles can cause a wide range of sensitive customer equipment such as adjustable speed drives or control equipment to drop out, thus affecting customers in Industrial Estate production losses.

### B. Voltage Sags - Characterization and Area of Vulnerability

#### 1) Voltage Sags - Characterization

Voltage sag can be characterized by their magnitude (voltage during fault) and their duration. Magnitude and duration are two essential and important sag characteristics which determine the equipment behavior.

- Sag magnitude : It is the net of rms voltage during the fault, in percent or per unit of nominal voltage (rated voltage).
- Sag duration : It is time the voltage is low, usually less than 1 second. The sag duration is dependent on the protection equipment.

#### 2) Area of vulnerability

The concept of area of vulnerability is used to visualize the retained voltage at the extrusion company due to a short circuit or fault somewhere in the network, which conclude that a large part of the distribution network is situated in the area of vulnerability of the extrusion industrial estate, the term of area of vulnerability was originally linked to equipment behavior. This has to be taken into account when investigating mitigation methods.

### III. VOLTAGE SAG ANALYSIS METHODOLOGY IN MEA'S DISTRIBUTION NETWORK

#### Analyzing Voltage sag Problems

The methodology used in voltage sag analysis using PSS/E software package is described as follow three steps :

- Step1 Load flow : A Load flow representing the existing or modified system is required. This purpose of paper is part of distribution network in Bang - Pu Industrial Estate.
- Step2 Voltage calculation : The number of section faulted (by simulation) is variable and is depended on the length of line. Customers' voltage was recorded for each fault condition.
- Step3 Data Compilation and Display : Results obtained from load flow, computations of voltage sag and changed the fault location to shown area of vulnerability.

#### Case study : Bang - Pu Industrial Estate

Khotor (KO) and Praekasa (PR) distribution substation is selected for demonstrating the practical case study. Both substations are located in the Bang - Pu Industrial Estate. KO substation supplies two power transformers, two outgoing 24 kV feeders from power transformer No.1 and five outgoing 24 kV feeders from power transformer No.2 and PR supplies three power transformers, three outgoing 24 kV feeders from power transformer No.1, three outgoing 24 kV feeders from power transformer No.2 and four outgoing 24 kV feeders from power transformer No.3

The system is selected because there have been complaints from a few customers connected to PR433 feeder, their sensitive production equipment tripped. They believed that it caused by voltage sag events following to figure 1.

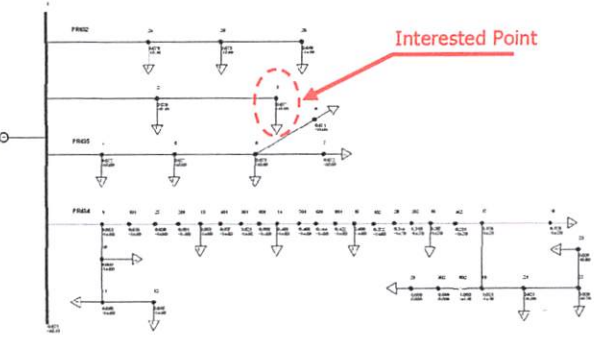


Fig. 1. Part of the Bang - Pu Industrial Estate Distribution Network under Study.

### IV. SIMULATION RESULTS AND DISCUSSION

Simulation results are shown for the cases where faults were applied along the PR434 feeder line. These locations were selected so as to determine the effect of distance and fault location on voltage sag. The types of faults considered for simulation were single line to ground due to it frequently occur in distribution network.

#### A. Effect of Sliding Fault on Voltage Sag

Fig. 2 shows the voltage sag contour for the case of sliding faults created along the line between node 9 to node 18. it can be seen from the figure that closer the sliding fault to substation (node 9) the wider the area of vulnerability for the same voltage sag magnitude of 0.05 p.u. it is noted that for faults created at 50% and more of the length of the PR434 following Fig.3, the voltage contour remain the same.

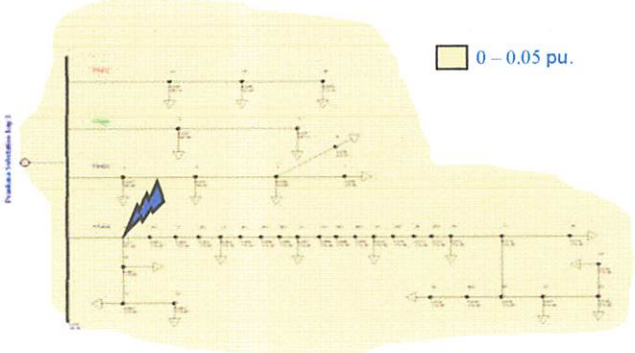


Fig. 2 Voltage sag contour shown 0.05 p.u. due to SLG fault at node 9.

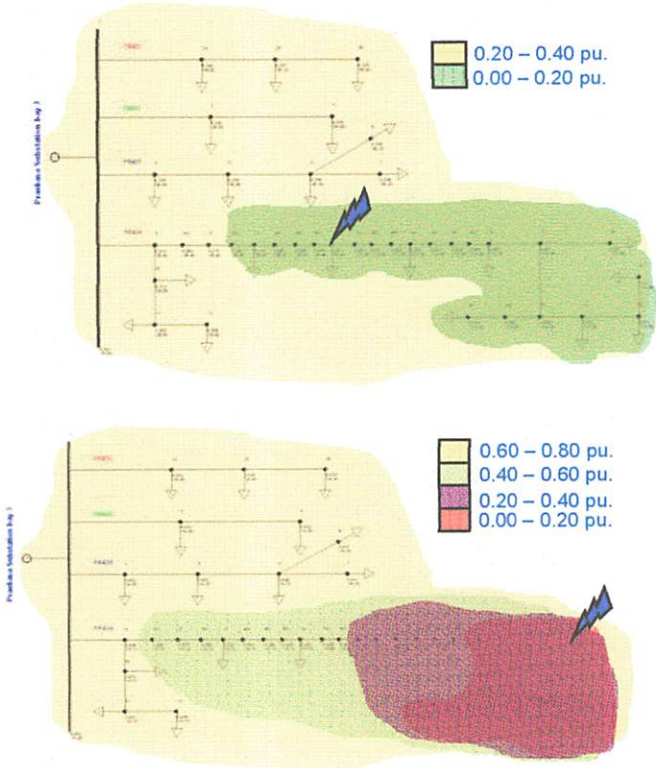


Fig. 3 Voltage sag contour due to SLG fault at node 14. and node 18.

#### B. Case study

Fig. 4 shown the voltage sag profile at customer on PR433 feeder due to fault created somewhere on PR434 feeder which sag magnitude equal to 0.633 p.u. which voltage sag Characterization at PR. Transformer No. 3 which sag magnitude equal to 0.640 p.u. and sag duration equal 0.16 s.

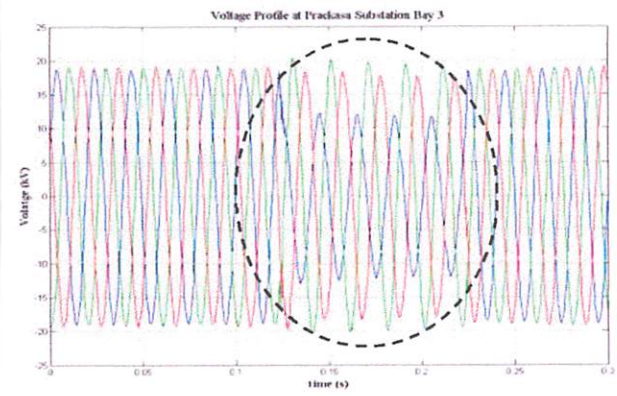
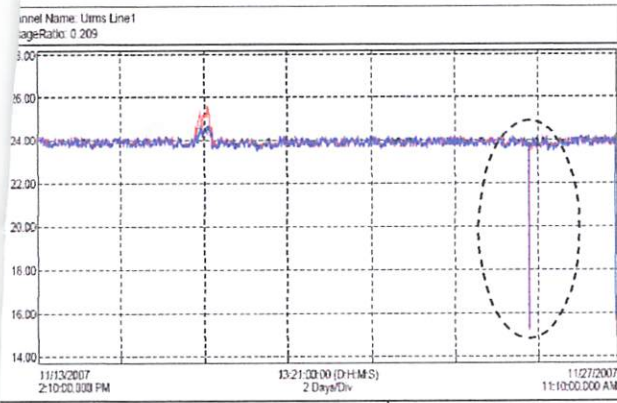


Fig 4 Voltage sag characterization at customer on PR433 feeder and PR Substation

Fig.5 shown simulation finding fault location on PR434 feeder (dummy node 901) to predict sag magnitude at customer on PR433 feeder.

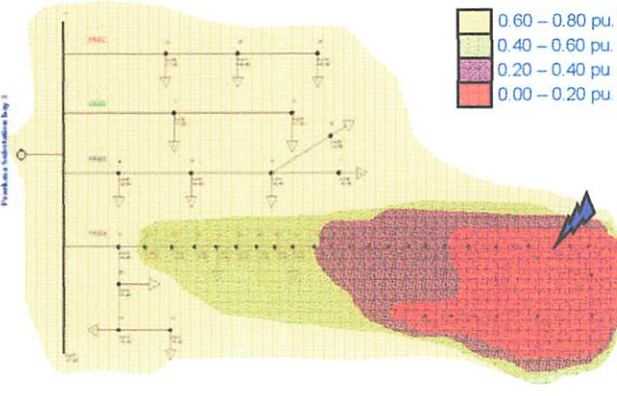


Figure 5. Shown Area of Vulnerability due to SLG fault at dummy node 901 on feeder PR434.

V. CONCLUSION

The voltage sag analysis using the PSS/E software has been applied to MEA's distribution system on Bang - Pu Industrial Estate. Simulation Result has been presents in terms of area of

vulnerability shown with the sag magnitude due to single line to ground fault with sliding fault location. A faulted located at distance close to source will have more area of vulnerability than fault located far from the source.

Measured data compared to simulation result is proximity. Simulation software can use to predict the area of vulnerability for improving MEA's distribution network.

REFERENCES

- [1] N. Abu Bakar, A. Mohamed, "A Case Study of Voltage Sag Analysis in a Utility Distribution System" Nation Power and Energy Conference (PECon) 2003 Proceedings, Bangi, Malaysia pp.333-336.
- [2] C.Radhakrishna, M.Eshwardas, and Gokul Chebiyam, "Impact of Voltage Sags in Practical Power System Networks" Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2001 IEEE/PES Volume I, Issue , 2001, pp. 567 - 572 Vol.1.
- [3] Math H.J. Bollen. "Understanding Power Quality Problems" IEEE Press, New York , 2000.
- [4] Tosak Thasanantariya, and Somchai Chatratana, "Stochastic Predication of Voltage Sags in an Industrial Estate" Industry Applications Conference, 2005. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Volume 2, Issue , 2-6 Oct. 2005, pp. 1489 - 1496 Vol. 2
- [5] R.C. Dugan, M.F. McGranaghan, S. Santoso, H. W. Beaty, Electrical Power Systems Quality, Mcgraw - Hill, New York, 2003.
- [6] IEEE Recommended Practice for Monitoring Electrical Power Quality, IEEE Standard 1159 -1995, Jun. 1995.

BIOGRAPHIES



Mr.Tanit Meananeatra was born on 3 May 1983 in Bangkok, Thailand. He received a Bachelor's degree in electrical engineering from the Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, KMITNB in 2005. He is studying in Master's degree in Electrical Power Engineering. Now, his research interested include power quality studies using Electromagnetic Transients Program (include DC) / Power System Computer Aided Design (EMTDC/PSCAD) and their application tools.



Mr.Naris Chatthanont was born on 26 June 1973, in Nonthaburi province Thailand. He received a Bachelor's degree in electrical engineering from the Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University. and a Master's degree of electrical power engineering (specific in High Voltage). Now, he research in power quality problems and power quality assessment in MEA's distribution system.



Mr.Suraphol Wanchana was born on 16 December 1963 in Rajchaburi province, Thailand. He received the Diploma in Electrical Power (Field of Specialization: Electrical Power) from Institute of technology and Vocational Education Bangkok Campus. He obtained a Bachelor's degree of Industrial Technology from Phranakorn Rajaphat University Bangkok in 2005. in presently, he is the specialist in distribution system and interest in power quality problems in MEA's distribution system.