

SKRIPSI
STUDI PENGATURAN TEGANGAN KELUARAN GENERATOR
SINKRON MENGGUNAKAN SISTEM POTENTIAL
SOURCE RECTIFIER EXCITER



Disusun dalam rangka memenuhi persyaratan untuk menyelesaikan studi di
Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin



SMAN

015

Optimized using
trial version
www.balesio.com

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK UNUVERSITAS HASANUDDIN

2020

LEMBAR PENGESAHAN

**STUDI PENGATURAN TEGANGAN KELUARAN GENERATOR
SINKRON MENGGUNAKAN SISTEM POTENTIAL SOURCE
RECTIFIER EXCITER**

Disusun Oleh:


ALVIAN USMAN

D411 15 015

Disusun dalam rangka memenuhi salah satu persyaratan untuk menyelesaikan
Program Strata Satu Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Makassar

Disahkan Oleh:

Pembimbing I


Dr. Yusran, ST., MT.
NIP. 19750404 200012 1 001

Pembimbing II


Dr. Ir. Sri Mawar Said, MT.
NIP. 19601106 198601 2 001

Mengetahui
Ketua Departemen Teknik Elektro,

Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T.
NIP. 19691026 199412 2 001

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Alvian Usman
NIM : D411 15 015
Departemen : Teknik Elektro
Juduk Skripsi : “Studi Pengaturan Tegangan Keluaran Generator Sinkron
Menggunakan Sistem *Potential Source Rectifier Exciter*”

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa penulisan skripsi ini berdasarkan hasil penelitian, pemikiran, dan pemaparan asli dari saya sendiri. Jika terdapat karya milik orang lain, saya mencantumkan sumber yang jelas. Apabila dikemudian hari terdapat ketidaksesuaian dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan aturan yang berlaku di Universitas Hasanuddin.

Demikian pernyataan ini dibuat dengan sadar untuk digunakan sebagaimana mestinya.

Makassar, 19 Oktober 2020


Alvian Usman

ABSTRACT

Potential source rectifier exciter (PSRE) system is an excitation system that utilizes the synchronous generator output voltage as a source of excitation current after rectifying it with a controlled rectifier. This study aims to compare the effect of load changes on the excitation current in a separate excitation system with a potential source rectifier exciter (PSRE) system, find out how to adjust the amount of excitation current in the PSRE system to adjust the output voltage of a synchronous generator and compare the effect of using a three-phase full wave controlled rectifier with a single-phase full wave controlled rectifier on the PSRE system. Observations were made by using three types of load circuits, namely resistive, inductive, and resistive-inductive loads using a three-phase full wave rectifier controlled type rectifier and a single-phase full wave rectifier controlled types rectifier. The results show that changes in the load value that have an impact on changes in the output voltage value of the synchronous generator do not affect the excitation current in a separate excitation system, while in the potential source rectifier exciter (PSRE) system, changes in the load value affect the excitation current because the excitation current is a function of the synchronous generator output voltage. The observations also show that the adjustment of the excitation current in a separate excitation system is done by adjusting the firing angle of the rectifier circuit. The firing angle causes the excitation current to become larger, so the output voltage of the synchronous generator also becomes larger. The use of a three-phase full wave controlled rectifier in the PSRE system can produce greater excitation current and make the system more balanced compared to the use of a single-phase full wave controlled rectifier.

Key words: PSRE, excitation current, output voltage, firing angle, controlled rectifier

ABSTRAK

Sistem *potential source rectifier exciter* (PSRE) merupakan sistem eksitasi yang memanfaatkan tegangan keluaran generator sinkron sebagai sumber arus eksitasi setelah disearahkan dengan penyearah terkendali. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan pengaruh perubahan beban terhadap arus eksitasi pada sistem eksitasi terpisah dengan sistem *potential source rectifier exciter* (PSRE), mengetahui cara mengatur besar arus eksitasi pada sistem PSRE untuk mengatur tegangan keluaran generator sinkron dan membandingkan pengaruh penggunaan penyearah jenis *three-phase full wave controlled rectifier* dengan *single-phase full wave controlled rectifier* pada sistem PSRE. Pengamatan dilakukan dengan menggunakan tiga jenis rangkaian beban yakni beban resistif, induktif, dan resistif-induktif dengan menggunakan penyearah terkendali jenis *three phase full wave rectifier controlled* dan *single-phase full wave controlled rectifier*. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa perubahan nilai beban yang berdampak terhadap perubahan nilai tegangan keluaran generator sinkron tidak mempengaruhi arus eksitasi pada sistem eksitasi terpisah, sedangkan pada sistem *potential source rectifier exciter* (PSRE), perubahan nilai beban mempengaruhi arus eksitasi karena arus eksitasi merupakan fungsi dari tegangan keluaran generator sinkron. Hasil pengamatan juga menunjukkan bahwa pengaturan arus eksitasi pada sistem PSRE dapat dilakukan dengan mengatur besar sudut penyalan rangkaian penyearah. Nilai sudut penyalan yang semakin kecil menyebabkan arus eksitasi menjadi semakin besar, sehingga tegangan keluaran generator sinkron juga menjadi semakin besar. Penggunaan penyearah jenis *three-phase full wave controlled rectifier* pada sistem PSRE dapat menghasilkan daya eksitasi yang lebih besar dan membuat sistem menjadi lebih seimbang dibandingkan dengan penggunaan penyearah jenis *single-phase full wave controlled rectifier*.



ici: PSRE, arus eksitasi, tegangan keluaran, sudut penyalan, *controlled rectifier*

KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmanirrahim

Segala puji bagi Allah Subhanahu wa Taala yang telah melimpahkan rahmat taufik, dan inayah-Nya sehingga penelitian yang telah dilakukan dan skripsi yang disusun dapat diselesaikan. Bershalawat kepada Rasulullah Muhammad Sallallahu alaihi wa Sallam yang telah menjadi pemimpin sejati yang pernah diutus oleh Allah swt. di dunia ini. Semoga kita termasuk orang-orang yang mendapatkan syafaat beliau di hari pembalasan kelak. Aamiin.

Skripsi ini berjudul **Studi Pengaturan Tegangan Keluaran Generator Sinkron Menggunakan Sistem *Potential Source Rectifier Exciter***. Skripsi ini merupakan salah satu unsur yang harus dipenuhi oleh mahasiswa Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin untuk dapat menyelesaikan masa studinya. Selain alasan utama tersebut, semoga penelitian yang ada di dalam skripsi ini juga dapat memberikan manfaat dan menambah wawasan mahasiswa Teknik Elektro.

Penyusunan skripsi ini membutuhkan waktu yang cukup lama. Penelitian ini dimulai pada bulan Mei 2019 hingga September 2020. Hal ini disebabkan karena awalnya penulis masih belum fokus mengerjakannya. Adanya tambahan tanggung jawab lain juga menjadi salah satu faktor terbaginya fokus penulis. Selain itu, munculnya pandemi Covid19 juga menjadi salah satu faktor yang menjadi penyebab lambatnya penelitian ini dilakukan. Namun demikian, setelah penulis bertekad kuat untuk menyelesaikan skripsi ini, akhirnya selangkah demi selangkah hal itu dapat terwujud.

Selesainya skripsi ini tidak lepas dari dukungan berbagai pihak yang telah berperan dalam memberikan bantuan, semangat, dan motivasi. Keikhlasan mereka membuat penulis dapat menyelesaikan skripsi ini lebih mudah meskipun tetap

api kendala. Untuk itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:
; tua tercinta yang telah memberikan dukungan moril dan materiil
gga skripsi ini dapat kami selesaikan. Mereka juga salah satu sumber



semangat penulis yang tidak terukur nilainya. Semoga mereka mendapatkan tempat yang layak di sisi Allah Subhanahu wa Taala yang telah dengan tulus ikhlas mendukung penulis demi memperoleh ilmu yang bermanfaat.

2. Bapak Prof. Dr. Ir. H. Salama Manjang, M.T. selaku Ketua Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. Bapak Dr. Yusran, ST., M.T. selaku Pembimbing I dan Ibu Dr. Ir. Sri Mawar Said, MT. selaku Pembimbing II, terima kasih telah bersedia membimbing penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
4. Bapak Prof. Dr.Eng. Syafaruddin, ST., M.Eng selaku Penguji I dan Bapak Ir. Gassing, MT. selaku Penguji II, terima kasih telah bersedia menguji skripsi penulis sehingga penulis dapat memahami lebih baik bahasan yang ada di dalam skripsi ini.
5. Seluruh dosen dan staf pengajar serta pegawai Departemen Teknik Elektro atas segala ilmu, bantuan, dan kemudahan yang diberikan selama penulis menempuh proses perkuliahan.
6. Senior-senior Anak Teknik yang telah memberikan wawasan keilmuan non Elektro sehingga penulis mampu memahami lebih jauh tentang berbagai hal dalam menghadapi berbagai konteks interaksi sosial.
7. Teman-teman Anak Teknik 2015 yang telah menemani penulis dalam menggagas ide-ide terbaik untuk kampus, bangsa, dan negara.
8. Teman-teman seangkatan THYR15TOR yang telah kebersamai segala aktivitas penulis di kampus, baik aktivitas akademik maupun non akademik sehingga tumbuh kreativitas dan pengalaman untuk terus maju dan berkembang. Semoga kita selalu solid dalam setiap urusan yang akan datang.
9. Teman-teman yang tergabung dalam grup Laboratorium Riset Mesin-Mesin Listrik yang telah memotivasi penulis agar dapat menyelesaikan skripsi ini.
10. Seluruh asisten Laboratorium Elektronika Daya dan Laboratorium Mesin-Mesin Listrik yang telah membagi ilmu dan pengalamannya sehingga penulis

peroleh pengetahuan yang lebih baik dibandingkan sebelumnya.

uh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu yang telah bantu dan mendukung penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.



Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih terdapat kekurangan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang diberikan akan menjadi bahan penulis untuk memperbaiki skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat memberikan tambahan pengetahuan kepada pribadi penulis dan setiap entitas yang membacanya.

Makassar, 19 Oktober 2020

Penulis



Optimized using
trial version
www.balesio.com

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN	iii
ABSTRACT	iv
ABSTRAK	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Batasan Masalah	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Generator Sinkron	5
2.1.1 Prinsip Dasar	5
2.1.2 Reaksi Jangkar	9
2.1.3 Alternator Tanpa Beban	12
2.1.4 Alternator Berbeban	13
2.2 Sistem Eksitasi Terpisah	13
2.2.1 Sistem Eksitasi DC	14
2.2.2 Sistem Eksitasi AC	15
2.3 Sistem <i>Potential Source Rectifier Exciter</i>	18
2.4 <i>Silicon Controlled Rectifier</i>	19
2.4.1 Struktur dan Operasi Dasar	21
2.4.2 Kurva Karakteristik SCR	24



2.5	<i>Single-Phase Full Wave Controlled Rectifier</i>	27
2.6	<i>Three-Phase Full Wave Controlled Rectifier</i>	30
BAB III METODE PENELITIAN.....		34
3.1	Judul Penelitian.....	34
3.2	Waktu dan Tempat Penelitian.....	34
3.3	Desain Penelitian	34
3.3.1	Alat Penelitian.....	34
3.3.2	Gambar Rangkaian.....	40
3.3.3	Data yang Dibutuhkan	49
3.3.4	Teknik Pengumpulan Data.....	50
3.3.5	Teknik Analisis Data.....	51
3.4	Tahapan Penelitian.....	52
3.5	Diagram Alir Penelitian.....	53
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		56
4.1	Generator Sinkron Tanpa Beban.....	56
4.2	Generator Sinkron Beban Resistif (R).....	59
4.3	Generator Sinkron Beban Induktif (L).....	95
4.4	Generator Sinkron Beban Resistif Induktif (RL).....	116
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		173
5.1	Kesimpulan	173
5.2	Saran	173
DAFTAR PUSTAKA		175
LAMPIRAN.....		177
Lampiran 1	Dokumentasi Pengambilan Data Penelitian di Laboratorium	177
Lampiran 2	Daftar Hasil Perhitungan Nilai Besaran-Besaran	182



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Konstruksi alternator [1].....	6
Gambar 2.2	Reaksi jangkar pada alternator [2].....	9
Gambar 2.3	Gelombang fluks utama dan fluks jangkar pada saat terjadi reaksi jangkar [1]	11
Gambar 2.4	(a) Kurva pemagnetan pada alternator tanpa beban [2] (b) Rangkaian ekuivalen alternator tanpa beban [2].....	12
Gambar 2.5	Model rangkaian dan diagram vektor dari alternator [2].....	13
Gambar 2.6	Sistem eksitasi DC dengan regulator tegangan amplidyne [3].....	14
Gambar 2.7	Sistem eksitasi <i>field-controlled alternator rectifier</i> [3].....	15
Gambar 2.8	Sistem eksitasi <i>alternator-supplied controlled rectifier</i> [3].....	16
Gambar 2.9	Sistem eksitasi <i>brushless</i> [3]	17
Gambar 2.10	Sistem PSRE [3]	19
Gambar 2.11	Rangkaian dalam dan symbol thyristor [6]	21
Gambar 2.12	Kurva karakteristik i-v thyristor [6]	26
Gambar 2.13	Rangkaian <i>single-phase full wave controlled rectifier</i> [7]	27
Gambar 2.14	Gelombang dari rangkaian pada Gambar 2.10 [7]	28
Gambar 2.15	Rangkaian <i>three-phase full wave controlled rectifier</i> [7].....	30
Gambar 2.16	Gelombang dari rangkaian pada Gambar 2.10 [7]	31
Gambar 2.17	Gelombang tegangan keluaran <i>three-phase full wave controlled rectifier</i> untuk beberapa nilai α [7].....	33
Gambar 3.1	Skema rangkaian penelitian <i>three-phase full wave controlled rectifier</i>	41
Gambar 3.2	Skema rangkaian penelitian <i>three-phase full wave controlled rectifier</i>	41
Gambar 3.3	Diagram rangkaian penelitian <i>three-phase full wave controlled rectifier</i>	42
Gambar 3.4	Diagram rangkaian penelitian <i>single-phase full wave controlled rectifier</i>	43



Gambar 3.5	Diagram alir penelitian	53
Gambar 3.6	Diagram alir pengambilan data pada Gambar 3.3	54
Gambar 3.7	Diagram alir pengambilan data pada Gambar 3.4	55
Gambar 4.1	Grafik hubungan I_f dengan V_{out} generator sinkron	58
Gambar 4.2	Rangkaian ekuivalen sistem PSRE penyearah tiga fasa	62
Gambar 4.3	Rangkaian ekuivalen sistem PSRE penyearah satu fasa	64
Gambar 4.4	Grafik hubungan beban R dengan V_{out} generator sinkron pada sistem eksitasi terpisah	77
Gambar 4.5	Grafik hubungan beban R dengan I_g generator sinkron pada sistem eksitasi terpisah	78
Gambar 4.6	Grafik hubungan beban R dengan P generator sinkron pada sistem eksitasi terpisah	79
Gambar 4.7	Grafik hubungan beban R dengan Q generator sinkron pada sistem eksitasi terpisah	80
Gambar 4.8	Grafik hubungan beban R dengan $\cos \varphi$ generator sinkron pada sistem eksitasi terpisah	80
Gambar 4.9	Grafik hubungan beban R dengan n generator sinkron pada sistem eksitasi terpisah	81
Gambar 4.10	Grafik hubungan beban R dengan V_{out} generator sinkron pada sistem PSRE.....	88
Gambar 4.11	Grafik hubungan beban R dengan I_g generator sinkron pada sistem PSRE.....	89
Gambar 4.12	Grafik hubungan beban R dengan P generator sinkron pada sistem PSRE.....	90
Gambar 4.13	Grafik hubungan beban R dengan Q generator sinkron pada sistem PSRE.....	90
Gambar 4.14	Grafik hubungan beban R dengan $\cos \varphi$ generator sinkron pada sistem PSRE	91
Gambar 4.15	Grafik hubungan beban R dengan n generator sinkron pada sistem PSRE.....	91



Gambar 4.16	Grafik hubungan beban R dengan V_f generator sinkron pada sistem PSRE.....	92
Gambar 4.17	Grafik hubungan beban R dengan I_f generator sinkron pada sistem PSRE.....	93
Gambar 4.18	Gelombang V_f beban R pada setiap posisi sakelar.....	94
Gambar 4.19	Grafik hubungan beban L dengan V_{out} generator sinkron pada sistem eksitasi terpisah	99
Gambar 4.20	Grafik hubungan beban L dengan I_g generator sinkron pada sistem eksitasi terpisah	100
Gambar 4.21	Grafik hubungan beban L dengan P generator sinkron pada sistem eksitasi terpisah	101
Gambar 4.22	Grafik hubungan beban L dengan Q generator sinkron pada sistem eksitasi terpisah	101
Gambar 4.23	Grafik hubungan beban L dengan $\cos \varphi$ generator sinkron pada sistem eksitasi terpisah	102
Gambar 4.24	Grafik hubungan beban L dengan n generator sinkron pada sistem eksitasi terpisah	102
Gambar 4.25	Grafik hubungan beban L dengan V_{out} generator sinkron pada sistem PSRE.....	110
Gambar 4.26	Grafik hubungan beban L dengan I_g generator sinkron pada sistem PSRE.....	111
Gambar 4.27	Grafik hubungan beban L dengan P generator sinkron pada sistem PSRE.....	111
Gambar 4.28	Grafik hubungan beban L dengan Q generator sinkron pada sistem PSRE.....	112
Gambar 4.29	Grafik hubungan beban L dengan $\cos \varphi$ generator sinkron pada sistem PSRE	112
Gambar 4.30	Grafik hubungan beban L dengan n generator sinkron pada sistem PSRE.....	113
Gambar 4.31	Grafik hubungan beban L dengan V_f generator sinkron pada sistem PSRE.....	114



Gambar 4.32	Grafik hubungan beban L dengan I_f generator sinkron pada sistem PSRE.....	114
Gambar 4.33	Gelombang V_f beban L pada setiap posisi sakelar.....	115
Gambar 4.34	Grafik hubungan beban RL dengan V_{out} generator sinkron pada sistem eksitasi terpisah	121
Gambar 4.35	Grafik hubungan beban RL dengan I_g generator sinkron pada sistem eksitasi terpisah	122
Gambar 4.36	Grafik hubungan beban RL dengan P generator sinkron pada sistem eksitasi terpisah	122
Gambar 4.37	Grafik hubungan beban RL dengan Q generator sinkron pada sistem eksitasi terpisah	123
Gambar 4.38	Grafik hubungan beban RL dengan $\cos \varphi$ generator sinkron pada sistem eksitasi terpisah	124
Gambar 4.39	Grafik hubungan beban RL dengan n generator sinkron pada sistem eksitasi terpisah	124
Gambar 4.40	Grafik hubungan beban RL dengan V_{out} generator sinkron pada sistem PSRE	132
Gambar 4.41	Grafik hubungan beban RL dengan I_g generator sinkron pada sistem PSRE.....	133
Gambar 4.42	Grafik hubungan beban RL dengan P generator sinkron pada sistem PSRE.....	134
Gambar 4.43	Grafik hubungan beban RL dengan Q generator sinkron pada sistem PSRE.....	134
Gambar 4.44	Grafik hubungan beban RL dengan $\cos \varphi$ generator sinkron pada sistem PSRE	135
Gambar 4.45	Grafik hubungan beban RL dengan n Generator sinkron pada sistem PSRE.....	135
Gambar 4.46	Grafik hubungan beban RL dengan V_f generator sinkron pada sistem PSRE.....	136
Gambar 4.47	Grafik hubungan beban RL dengan I_f generator sinkron pada sistem PSRE.....	137



Gambar 4.48	Gelombang V_f beban RL pada setiap posisi sakelar	138
Gambar 4.49	Grafik hubungan beban RL dengan V_{out} generator sinkron pada sistem PSRE dengan mengatur besar α	146
Gambar 4.50	Grafik hubungan beban RL dengan I_g generator sinkron pada sistem PSRE dengan mengatur besar α	147
Gambar 4.51	Grafik hubungan beban RL dengan P generator sinkron pada sistem PSRE dengan mengatur besar α	148
Gambar 4.52	Grafik hubungan beban RL dengan Q generator sinkron pada sistem PSRE dengan mengatur besar α	148
Gambar 4.53	Grafik hubungan beban RL dengan $\cos \varphi$ generator sinkron pada sistem PSRE dengan mengatur besar α	149
Gambar 4.54	Grafik hubungan beban RL dengan n generator sinkron pada sistem PSRE dengan mengatur besar α	149
Gambar 4.55	Grafik hubungan beban RL dengan V_f generator sinkron pada sistem PSRE dengan mengatur besar α	150
Gambar 4.56	Grafik hubungan beban R dengan I_f generator sinkron pada sistem PSRE dengan mengatur besar α	150
Gambar 4.57	Grafik hubungan sudut penyalaan α dengan V_{out} generator sinkron pada sistem PSRE beban RL	151
Gambar 4.58	Gelombang V_f beban RL pada setiap posisi sakelar dengan mengatur besar α	152
Gambar 4.59	Grafik hubungan beban RL dengan pada V_{out} sistem PSRE menggunakan penyearah satu fasa	163
Gambar 4.60	Grafik hubungan beban RL dengan I_g pada sistem PSRE menggunakan penyearah satu fasa	164
Gambar 4.61	Grafik hubungan beban RL dengan P pada sistem PSRE menggunakan penyearah satu fasa	164
Gambar 4.62	Grafik hubungan beban RL dengan Q pada sistem PSRE menggunakan penyearah satu fasa	165
Gambar 4.63	Grafik hubungan beban RL dengan $\cos \varphi$ pada sistem PSRE menggunakan penyearah satu fasa	165



Gambar 4.64	Grafik hubungan beban RL dengan n pada sistem PSRE menggunakan penyearah satu fasa	166
Gambar 4.65	Grafik hubungan beban RL dengan V_f pada sistem PSRE menggunakan penyearah satu fasa	167
Gambar 4.66	Grafik hubungan beban RL dengan I_f pada sistem PSRE menggunakan penyearah satu fasa	168
Gambar 4.67	Gelombang V_f beban RL pada setiap posisi sakelar dengan mengatur besar α menggunakan penyearah satu fasa	169



DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Daftar alat-alat yang digunakan dalam penelitian.....	34
Tabel 3.2	Data beban alat DL 1017R <i>Resistive Load</i>	39
Tabel 3.3	Data beban alat DL 1017L <i>Inductive Load</i>	40
Tabel 3.4	Konfigurasi dasar alat-alat yang digunakan dalam penelitian	49
Tabel 3.5	Data Penelitian yang dibutuhkan.....	50
Tabel 4.1	Pengukuran pada generator sinkron tanpa beban (arus eksitasi minimum ke maksimum)	57
Tabel 4.2	Pengukuran pada generator sinkron tanpa beban (arus eksitasi minimum ke maksimum)	57
Tabel 4.3	Hasil pengukuran generator sinkron beban R pada sistem eksitasi terpisah	60
Tabel 4.4	Hasil perhitungan teori generator sinkron beban R pada sistem eksitasi terpisah	77
Tabel 4.5	Pengukuran generator sinkron beban R pada sistem PSRE	83
Tabel 4.6	Hasil perhitungan teori generator sinkron beban R pada sistem PSRE	88
Tabel 4.7	Pengukuran generator sinkron beban L pada sistem eksitasi terpisah	95
Tabel 4.8	Hasil perhitungan teori generator sinkron beban L pada sistem eksitasi terpisah	99
Tabel 4.9	Pengukuran generator sinkron beban L pada sistem PSRE	104
Tabel 4.10	Hasil perhitungan teori generator sinkron beban L pada sistem PSRE	109
Tabel 4.11	Pengukuran generator sinkron beban RL pada sistem eksitasi terpisah	117
Tabel 4.12	Hasil perhitungan teori generator sinkron beban RL pada sistem eksitasi terpisah	121
3	Pengukuran generator sinkron beban RL pada sistem PSRE.....	126



Tabel 4.14 Hasil perhitungan teori generator sinkron beban L pada sistem PSRE	132
Tabel 4.15 Pengukuran generator sinkron beban RL pada sistem PSRE dengan mengatur besar sudut penyalaaan (α)	140
Tabel 4.16 Hasil perhitungan teori generator sinkron beban RL pada sistem PSRE dengan mengatur besar sudut penyalaaan (α).....	145
Tabel 4.15 Pengukuran generator sinkron beban RL pada sistem PSRE dengan mengatur besar sudut penyalaaan (α).....	154
Tabel 4.18 Pengukuran generator sinkron beban RL pada sistem PSRE menggunakan single phase full wave rectifier controlled.....	162



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Berbagai jenis energi dapat dikonversi dalam usaha pembangkitan energi listrik, antara lain energi air, angin, surya, uap, nuklir, gas, dan sebagainya. Proses konversi energi menggunakan berbagai peralatan. Salah satu alat utamanya adalah generator sinkron. Generator sinkron dapat mengubah salah satu bentuk energi lain menjadi energi listrik, seperti pada pembangkit listrik tenaga air (PLTA). PLTA menggunakan air untuk memutar turbin yang terkopel dengan rotor generator yang diberikan arus eksitasi (arus searah), sehingga energi listrik dapat dibangkitkan.

Frekuensi dan tegangan merupakan parameter yang wajib diperhatikan untuk memperoleh energi listrik yang berkualitas. Kualitas listrik yang buruk akan merugikan konsumen. Peralatan-peralatan listrik rumah tangga juga dapat mengalami kerusakan akibat kualitas energi listrik yang buruk.

Perubahan beban yang terjadi secara simultan menyebabkan terjadinya perubahan daya yang dibutuhkan. Penambahan beban menjadikan daya yang dibangkitkan juga harus ditambah. Penambahan daya aktif dipengaruhi oleh penambahan jumlah beban resistif, sementara penambahan daya reaktif disebabkan oleh beban induktif. Penambahan beban kapasitif akan menjadi sumber daya reaktif (contohnya *capasitor bank*). Pembangkit yang tidak menyuplai daya aktif yang dibutuhkan sistem akan menyebabkan terjadinya penurunan frekuensi, sedangkan jika daya reaktif yang dibutuhkan beban tidak disuplai maka akan menyebabkan terjadinya penurunan tegangan pada sistem. Respon pembangkit terhadap perubahan beban menjadi sangat penting untuk diperhatikan agar tetap dapat menyuplai kebutuhan beban.

Kebutuhan daya reaktif sistem yang berubah-ubah dilayani dengan menggunakan perangkat tambahan yang disebut *automatic voltage regulator*



(AVR). AVR berfungsi untuk mengatur tegangan dengan cara mengatur arus eksitasi yang berupa arus searah (DC) pada generator sinkron yang ada di sisi pembangkit. Arus eksitasi dapat bersumber dari terminal keluaran generator sinkron yang terhubung dengan rangkaian penyearah terkendali pada sistem eksitasi statis. Sistem eksitasi ini dikenal dengan *potential source rectifier exciter* (PSRE).

Sumber arus eksitasi berasal dari terminal keluaran generator sinkron pada sistem PSRE. Hal ini menyebabkan arus eksitasi akan ikut berubah saat terjadi perubahan pada tegangan keluaran generator sinkron, sehingga arus eksitasi menjadi fungsi tegangan keluaran generator sinkron. Keadaan beban yang berubah-ubah setiap waktu akan mempengaruhi tegangan keluaran generator sinkron sehingga juga akan berpengaruh pada arus eksitasinya. Perubahan beban yang menyebabkan perubahan arus eksitasi menjadikan arus eksitasi sebagai fungsi dari beban sehingga perlu dilakukan studi terkait mekanisme kerja sistem PSRE dalam membangkitkan eksitasi serta bagaimana melakukan pengaturan tegangan keluaran generator sinkron agar dapat memudahkan insinyur kelistrikan dalam merancang pembangkit dengan menggunakan sistem eksitasi jenis tersebut.

1.2 Rumusan Masalah

Masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana perbandingan pengaruh perubahan beban terhadap arus eksitasi pada sistem eksitasi terpisah dengan sistem *potential source rectifier exciter* (PSRE)?
2. Bagaimana cara mengatur arus eksitasi untuk mengatur tegangan keluaran generator sinkron pada sistem *potential source rectifier exciter* (PSRE)?
3. Bagaimana perbandingan pengaruh penggunaan penyearah jenis *three-phase full wave controlled rectifier* dengan *single-phase full wave controlled rectifier* pada sistem *potential source rectifier exciter* (PSRE)?



1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian yang dilakukan bertujuan untuk:

1. Membandingkan pengaruh perubahan beban terhadap arus eksitasi pada sistem eksitasi terpisah dengan sistem *potential source rectifier exciter* (PSRE)
2. Memahami cara mengatur arus eksitasi untuk mengatur tegangan keluaran generator sinkron pada sistem *potential source rectifier exciter* (PSRE).
3. Membandingkan pengaruh penggunaan penyearah jenis *three-phase full wave controlled rectifier* dengan *single-phase full wave controlled rectifier* pada sistem *potential source rectifier exciter* (PSRE).

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Mampu merancang sistem eksitasi yang menggunakan generator sinkron dengan sistem eksitasi *potential source rectifier exciter* (PSRE) pada suatu pembangkit listrik.
2. Mengetahui efisiensi penggunaan daya keluaran generator sebagai sumber eksitasi terhadap perubahan beban.

1.5 Batasan Masalah

Ruang lingkup masalah yang akan dibahas di dalam penelitian ini mencakup:

1. Sistem eksitasi statis yang bersumber dari *power supply* (eksitasi terpisah) dan bersumber dari keluaran generator sinkron (PSRE).
2. Rangkaian thyristor yang digunakan adalah *three-phase full wave controlled rectifier* dan *single-phase full wave controlled rectifier*.
3. Pengaturan sudut penyalan *gate SCR* dilakukan secara manual.
4. Jenis beban yang digunakan dalam penelitian ini adalah beban resistif dan induktif.



1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi gambaran awal dari tugas akhir ini, berupa latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi landasan teori yang mendasari proses pengambilan dan pengolahan data serta penarikan kesimpulan akhir dari penelitian.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini berisi metode pelaksanaan penelitian, lokasi penelitian, waktu penelitian, dan proses pengambilan data.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi data yang telah diperoleh dan dianalisis sesuai dengan kebutuhan penelitian.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan dan saran-saran.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Generator Sinkron

Generator sinkron merupakan jenis mesin listrik yang berfungsi untuk menghasilkan tegangan bolak-balik dengan cara mengubah energi mekanis menjadi energi listrik. Energi mekanis diperoleh dari putaran rotor yang digerakkan oleh penggerak mula (*prime mover*), sedangkan energi listrik diperoleh dari proses induksi elektromagnetik yang terjadi pada kumparan stator dan rotornya.

Generator sinkron dengan defenisi sinkronnya, mempunyai makna bahwa frekuensi listrik pada stator memiliki nilai yang sama dengan frekuensi putaran mekanis rotor. Rotor generator sinkron yang terdiri dari belitan medan dengan suplai arus searah akan menghasilkan medan magnet yang diputar dengan kecepatan yang sama dengan kecepatan putaran rotor.

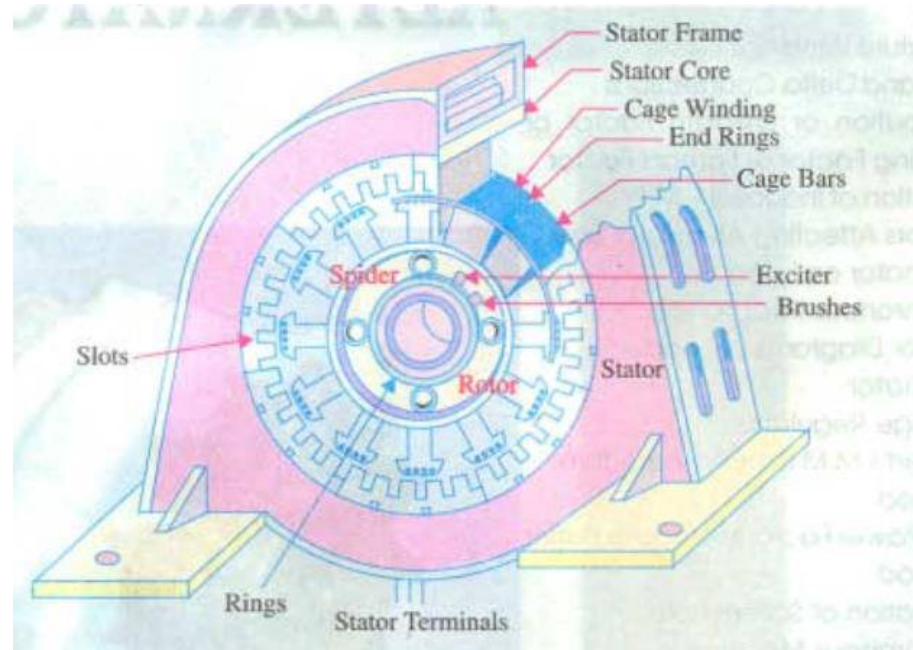
Generator sinkron sering dijumpai pada pusat-pusat pembangkit tenaga listrik (dengan kapasitas yang relatif besar). Misalnya pada PLTA, PLTU, PLTD, dan lain-lain. Selain generator dengan kapasitas besar, dikenal juga generator dengan kapasitas yang relatif kecil, misalnya generator yang digunakan untuk penerangan darurat yang sering disebut genset.

2.1.1 Prinsip Dasar

Generator AC (*alternating current*) atau alternator (seperti yang sering disebutkan) bekerja dengan prinsip dasar yang sama yakni induksi elektromagnetik seperti pada generator DC (*direct current*). Mereka juga terdiri dari belitan jangkar dan medan magnet. Tapi, ada satu hal penting yang menjadi perbedaan antara keduanya yakni pada generator DC, jangkar berputar dan sistem medannya statis, sementara susunan alternator adalah sebaliknya. Konstruksi standar terdiri dari belitan jangkar yang terpasang pada elemen statis yang disebut stator



dan belitan medan pada elemen berputar yang disebut rotor [1]. Gambar 2.1 menunjukkan konstruksi dari alternator.



Gambar 2.1 Konstruksi alternator [1]

Stator terdiri dari kerangka besi yang menopang inti jangkar, memiliki slot di bagian dalamnya untuk menampung konduktor jangkar. Rotor seperti roda gila yang memiliki kutub N (*North* atau Utara) dan S (*South* atau Selatan) yang terpasang pada pelek luarnya. Kutub magnet terkesitasi (atau termagnetisasi) dari arus searah yang disuplai oleh sumber DC pada 125 hingga 600 volt. Arus eksitasi yang diperlukan diperoleh dari generator shunt DC kecil yang dihubungkan atau dipasang pada poros alternator itu sendiri dalam kebanyakan kasus. Medan magnet yang berputar menyebabkan arus disuplai melalui dua *slip-rings*. Tegangan eksitasi yang relatif kecil menyebabkan *slip-rings* dan *brush gear* memiliki konstruksi yang ringan. Akhir-akhir ini, sistem *brushless excitation* telah dikembangkan dimana eksiter AC tiga fasa dan grup *rectifier* (penyearah) menyuplai arus searah ke alternator sehingga sikat-sikat, *slip-rings*, dan komutator ditiadakan [1].



Konduktor stator (tidak bergerak) dipotong oleh fluks magnet ketika rotor berputar, sehingga terinduksi gaya gerak listrik (ggl) pada stator. Kutub magnet yang bergantian antara kutub N dan S menginduksikan suatu ggl dan karenanya arus pada konduktor jangkar yang pertama kali mengalir dalam satu arah dan kemudian untuk arah yang lain. Suatu ggl bolak-balik diinduksikan ke konduktor stator yang (1) memiliki frekuensi tergantung pada jumlah kutub N dan S yang bergerak melewati konduktor dalam waktu satu detik; dan (2) memiliki arah yang diberikan sesuai kaidah tangan kanan Fleming [1].

Generator sinkron memiliki prinsip kerja yang hampir sama dengan generator lain. Adapun prinsip kerja generator sinkron adalah sebagai berikut.

1. Kumparan medan yang terdapat sumber eksitasi tertentu akan menyuplai arus searah (DC) terhadap kumparan medan sehingga menimbulkan fluks yang besarnya terhadap waktu adalah tetap. Arus bolak-balik tidak digunakan sebagai arus eksitasi karena menghasilkan fluks yang berubah-ubah terhadap waktu. Fluks medan yang berubah-ubah terhadap waktu akan menghasilkan sinyal ggl yang terdistorsi.
2. Penggerak mula (*prime mover*) yang sudah terkopel dengan rotor segera dioperasikan sehingga rotor akan berputar pada kecepatan nominalnya.

$$n = \frac{120f}{P} \quad (2.1)$$

dimana: n = kecepatan putar rotor (rpm)

P = jumlah kutub rotor

f = frekuensi (Hz).

3. Perputaran rotor tersebut sekaligus akan memutar medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan medan. Medan berputar yang dihasilkan pada rotor akan mengenai kumparan jangkar sehingga pada kumparan jangkar yang terletak di stator akan menghasilkan



fluks magnetik yang berubah-ubah besarnya terhadap waktu. Adanya perubahan fluks magnetik yang melingkupi suatu kumparan akan menimbulkan GGL induksi pada ujung-ujung kumparan tersebut. Hal tersebut sesuai dengan persamaan berikut.

$$\begin{aligned}
 e(t) &= -N \frac{d\phi}{dt} \\
 &= -N \frac{d\phi_{maks} \sin \omega t}{dt} \\
 &= -N \omega \phi_{maks} \cos \omega t \\
 &= -N(2\pi f) \phi_{maks} \cos \omega t \\
 &= -N(2\pi \frac{nP}{120}) \phi_{maks} \cos \omega t \\
 &= -N(2.3,14 \frac{nP}{120}) \phi_{maks} \cos \omega t \quad (2.2)
 \end{aligned}$$

maka:

$$E_{maks} = N \left(2.3,14 \frac{nP}{120} \right) \phi_{maks} \quad (2.3)$$

sehingga:

$$\begin{aligned}
 E &= \frac{E_{maks}}{\sqrt{2}} \\
 &= \frac{N \left(2.3,14 \frac{nP}{120} \right) \phi_{maks}}{\sqrt{2}} \\
 &= \frac{4,44NPn\phi_{maks}}{120} \quad (2.4)
 \end{aligned}$$

bila:

$$c = \frac{4,44NP}{120} \quad (2.5)$$

maka:

$$E = cn\phi_{maks} \quad (2.6)$$

dengan:

- | | | | |
|-----|---------------------------|-----|------------------|
| E | = Ggl induksi efektif (V) | n | = putaran (rpm) |
| N | = jumlah belitan | f | = frekuensi (Hz) |
| c | = konstanta generator | P | = jumlah kutub |



ϕ_{maks} = fluks magnetik maksimum
(weber)

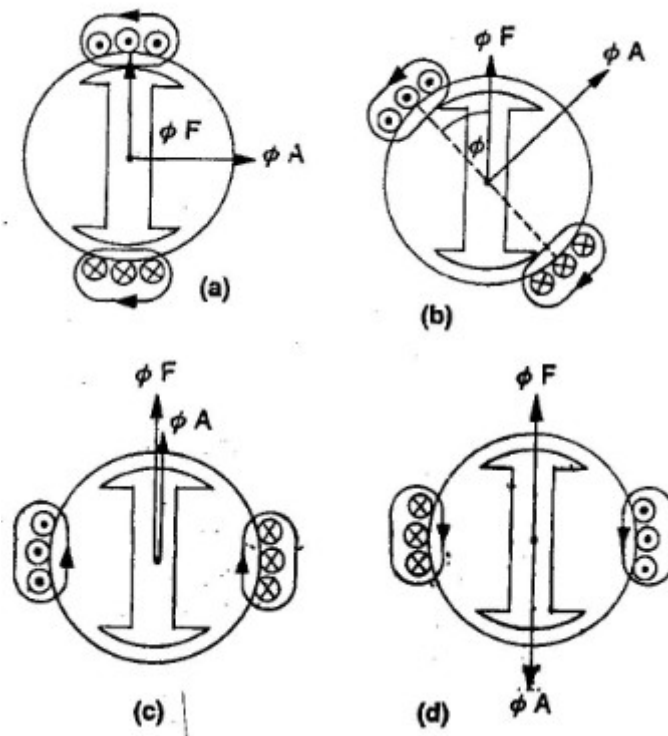
2.1.2 Reaksi Jangkar

Apabila alternator melayani beban, maka pada kumparan jangkar stator mengalir arus dan arus ini akan menimbulkan fluks jangkar. Fluks jangkar yang ditimbulkan arus (ϕ_A) akan berinteraksi dengan fluks yang dihasilkan kumparan medan rotor (ϕ_F), sehingga menghasilkan fluks resultante (ϕ_R) [2].

$$\phi_R = \phi_F + \phi_A \quad (2.7)$$

Adanya interaksi ini dikenal sebagai reaksi jangkar. Persamaan (2.7) menunjukkan penjumlahan secara vektor dari reaksi jangkar.

Kondisi reaksi jangkar untuk berbagai macam jenis beban adalah sebagai berikut.



Gambar 2.2 Reaksi jangkar pada alternator [2]



Keterangan Gambar 2.2 Reaksi jangkar pada alternator :

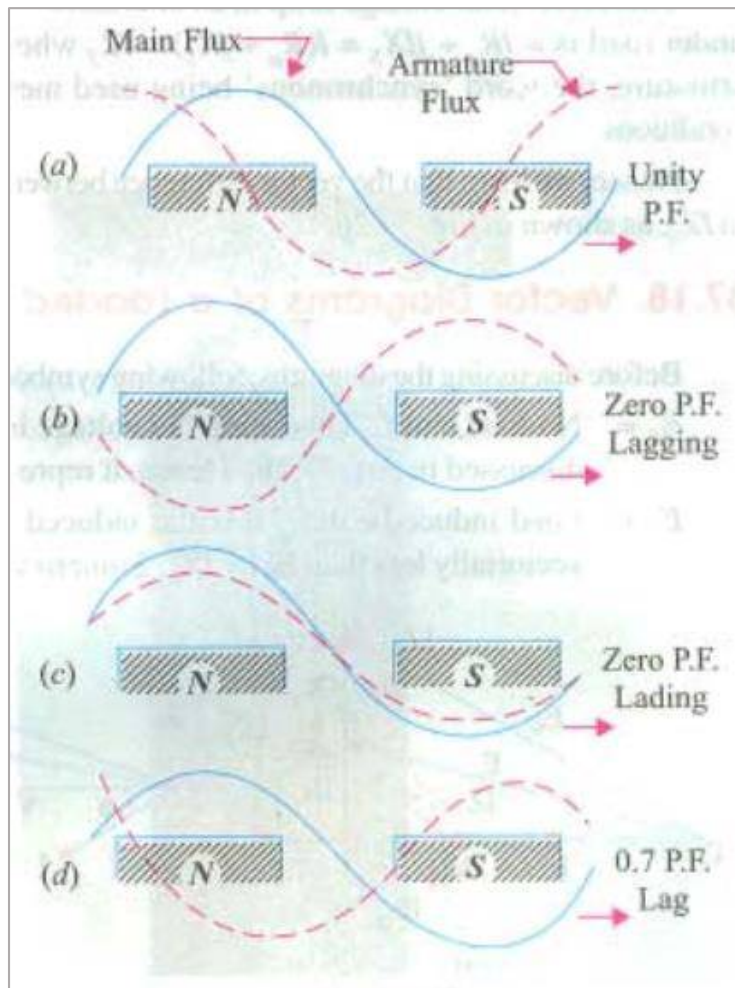
<p>Gambar 2.2 (a):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Arus jangkar (I) sefasa dengan GGL (E) • Jenis beban: tahanan (resistif) • ϕ_A tegak lurus terhadap ϕ_F 	<p>Gambar 2.2 (b):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Arus jangkar (I) terdahulu dengan sudut θ dari GGL (E) • Jenis beban: kapasitif • ϕ_A terbelakang dengan sudut ($90^\circ - \theta$)
<p>Gambar 2.2 (c):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Arus jangkar (I) terdahulu 90° dari GGL (E) • Jenis beban: kapasitif murni • ϕ_A memperkuat ϕ_F, terjadi pengaruh pemagnetan 	<p>Gambar 2.2 (d):</p> <ul style="list-style-type: none"> • arus jangkar (I) terbelakang 90° dari GGL (E) • Jenis beban: induktif murni • ϕ_A memperlemah ϕ_F, terjadi pengaruh pendemagnetan

Reaksi jangkar pada alternator bergantung pada jenis beban yang dilayani, dengan perkataan lain bergantung pada sudut fasa antara arus jangkar (I) dengan tegangan induksi (ggl) [2].

Pengaruh perbedaan faktor daya akibat jenis beban berbeda yang dilayani alternator dapat dilihat pada Gambar 2.3.

Gambar 2.3(a) menunjukkan faktor kerja alternator sama dengan satu dimana fluks jangkar memagnetisasi silang. Hasilnya adalah bahwa fluks di ujung-ujung depan kutub berkurang, sementara di ujung-ujung belakang meningkat. Kedua efek ini hampir saling mengimbangi sehingga rata-rata kekuatan medan konstan atau dengan kata lain, reaksi jangkar untuk faktor daya sama dengan satu terdistorsi [1].





Gambar 2.3 Gelombang fluks utama dan fluks jangkar pada saat terjadi reaksi jangkar [1]

Gambar 2.3(b) menunjukkan fluks jangkar (memiliki gelombang yang telah bergerak mundur 90°) berada pada arah berlawanan dengan fluks utama, sehingga fluks utama menjadi berkurang. Reaksi jangkar pada kasus ini sepenuhnya mendemagnetisasi, sehingga hasilnya adalah terjadinya pelemahan fluks utama dan kurangnya GGL induksi yang dibangkitkan [1].

Gambar 2.3(c) menunjukkan gelombang fluks jangkar telah bergerak maju 90° sehingga sefasa dengan fluks utama. Hasilnya meningkatkan fluks utama. Reaksi jangkar sepenuhnya memagnetisasi sehingga GGL yang terinduksi menjadi lebih besar [1].

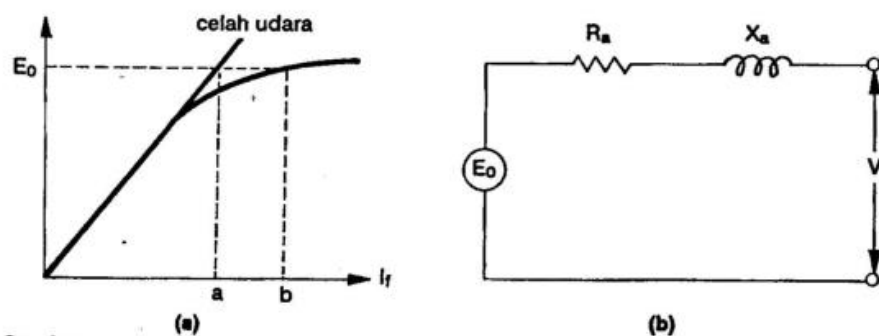


Gambar 2.4(d) merupakan kondisi dengan faktor daya ditengah-tengah. Efek yang ditimbulkan adalah sebagian terdistorsi dan sebagian pula terdemagnetisasi (karena faktor daya terbelakang) [1].

2.1.3 Alternator Tanpa Beban

Alternator yang diputar pada kecepatan sinkron dan rotor yang diberi arus medan (I_f), tegangan (E_o) akan terinduksi pada kumparan jangkar stator. Hubungan ini dapat dilihat pada persamaan (2.1) [2].

Arus jangkar tidak mengalir pada stator dalam keadaan tanpa beban, karenanya tidak terdapat pengaruh reaksi jangkar. Fluks hanya dihasilkan oleh arus medan (I_f). Apabila arus medan (I_f) diubah-ubah harganya, akan diperoleh harga (E_o) seperti yang terlihat pada kurva pemagnetan pada Gambar 2.4 [2].



Gambar 2.4 (a) Kurva pemagnetan pada alternator tanpa beban [2]
(b) Rangkaian ekuivalen alternator tanpa beban [2]

dengan: ab = tambahan arus medan yang diperlukan daerah jenuh
 R_a = tahanan stator
 X_a = fluks bocor
 $E_o = V$ (keadaan tanpa beban)



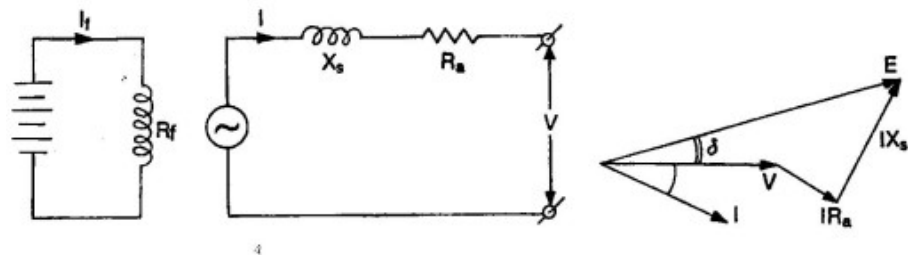
2.1.4 Alternator Berbeban

Alternator dalam keadaan berbeban menyebabkan arus jangkar akan mengalir dan mengakibatkan terjadinya reaksi jangkar. Reaksi jangkar bersifat reaktif, karena itu dinyatakan sebagai reaktans dan disebut reaktans pemagnet (X_m). Reaktans pemagnet ini bersama-sama dengan reaktans fluks bocor (X_a) dikenal sebagai reaktansi sinkron (X_s) [2].

$$E = V + IR_a + jIX_s \quad (2.8)$$

$$X_s = X_m + X_a \quad (2.9)$$

Model rangkaian dan diagram vektor dari alternator berbeban induktif (faktor kerja terbelakang) dapat dilihat pada Gambar 2.5 Model rangkaian dan diagram vektor dari alternator .



Gambar 2.5 Model rangkaian dan diagram vektor dari alternator [2]

2.2 Sistem Eksitasi Terpisah

Fungsi dasar dari sistem eksitasi adalah menyediakan arus searah (DC) ke lilitan medan. Sistem eksitasi juga menjalankan fungsi kontrol dan pelindung yang penting untuk kinerja yang memuaskan dari sistem tenaga dengan mengontrol tegangan medan dan arus medan [3].

Fungsi kontrol termasuk kontrol tegangan dan aliran daya reaktif serta peningkatan stabilitas sistem. Fungsi proteksi memastikan bahwa batas kemampuan mesin sinkron, sistem eksitasi, dan peralatan lainnya tidak terlanggahi [3].

Sistem eksitasi telah memiliki banyak bentuk selama bertahun-tahun ini. Mereka dapat diklasifikasikan ke dalam tiga kategori besar



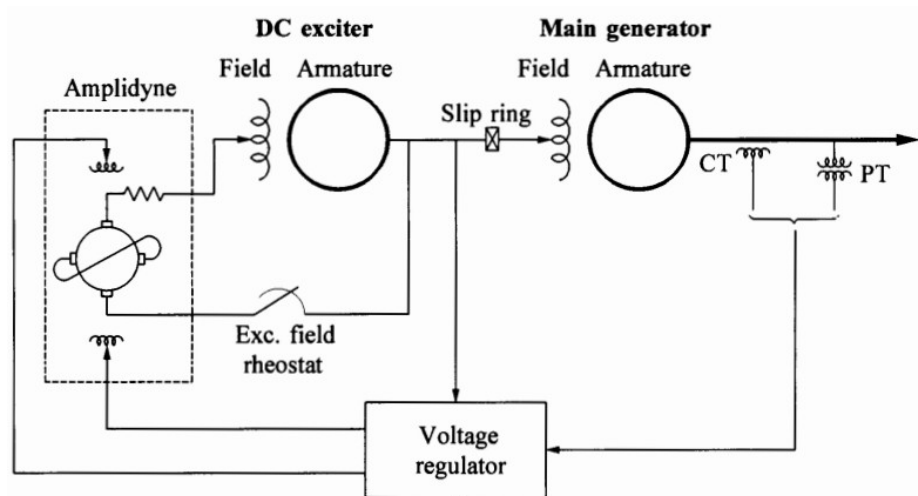
berdasarkan sumber eksitasi yang digunakan yaitu: (a) sistem eksitasi DC; (b) sistem eksitasi AC; dan (c) sistem eksitasi statis [3].

Sistem eksitasi DC dan sistem eksitasi AC merupakan sistem eksitasi terpisah. Sumber eksitasi kedua sistem ini tidak diperoleh dari generator utama, melainkan diperoleh dari sumber lain (sumber eksternal). Kedua sistem ini juga tergolong ke dalam jenis sistem eksitasi dinamis yakni eksitasi disuplai dari mesin bergerak.

2.2.1 Sistem Eksitasi DC

Sistem eksitasi DC memanfaatkan generator DC sebagai sumber eksitasi dan menyediakan arus ke rotor mesin sinkron melalui cincin geser (*slip rings*). *Exciter* ini dapat digerakkan oleh motor atau poros generator. Medan eksitasinya dapat berupa eksitasi terpisah atau eksitasi sendiri. Medan eksitasi pada saat menggunakan sistem eksitasi sendiri disuplai oleh *pilot exciter* yang memiliki sebuah *permanent magnet generator* (PMG) [3].

Sistem eksitasi DC merupakan sistem awal yang mencakup tahun 1920-1960-an. Sistem ini kehilangan dukungan pada pertengahan 1960 dan digantikan oleh *exciter* AC [3]. Gambar 2.6 menunjukkan contoh sistem eksitasi DC.



Gambar 2.6 Sstem eksitasi DC dengan regulator tegangan amplidyne [3]



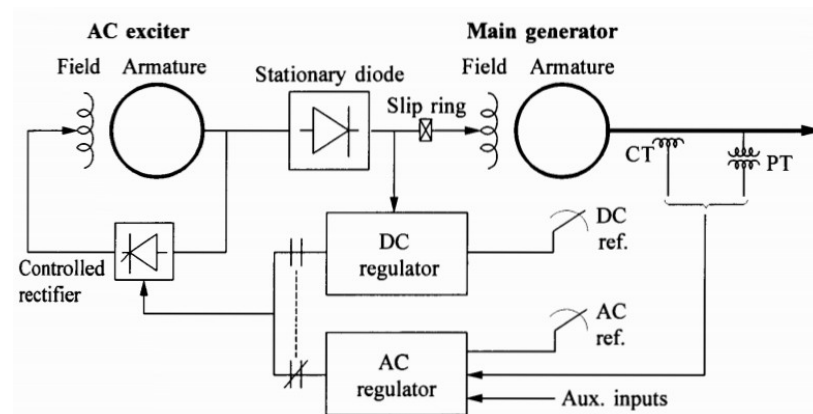
2.2.2 Sistem Eksitasi AC

Sistem eksitasi AC memanfaatkan alternator (meisn AC) sebagai sumber dari daya eksitasi generator utama. *Exciter* ini biasanya terdapat pada poros yang sama dengan generator turbin. Keluaran AC *exciter* ini disearahkan dengan menggunakan penyearah terkontrol atau tidak terkontrol untuk menghasilkan arus searah yang dibutuhkan medan generator. Penyearahnya dapat berupa penyearah statis atau berputar [3]. Berikut ini merupakan penjelasan tentang penyearah statis dan penyearah berputar pada sistem eksitasi AC.

a. Sistem Penyearah Statis

Keluaran DC pada sistem penyearah statis disuplai ke kumparan medan generator utama melalui cincin geser [3].

Regulator mengontrol medan *exciter* AC yang mengubah tegangan keluaran *exciter* pada saat menggunakan penyearah tidak terkontrol. Diagram satu garis sederhana dari sistem eksitasi *field controlled alternator rectifier* ditunjukkan pada Gambar 2.7. Gambar 2.7 menunjukkan perwakilan dari sistem eksitasi General Electric ALTERREX¹, *exciter* alternator digerakkan dari rotor generator utama. *Exciter* ini tereksitasi sendiri dengan daya medan berasal dari penyearah thyristor. Regulator tegangan memperoleh daya dari tegangan keluaran *exciter* [3].



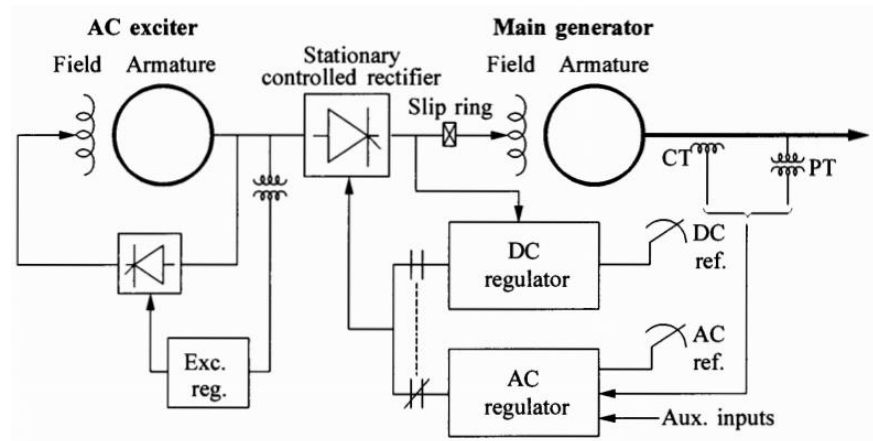
Gambar 2.7 Sistem eksitasi *field-controlled alternator rectifier* [3]



EX merupakan merek dagang dari General Electric Co.

Alternatif dari sistem *field-controlled alternator rectifier* menggunakan *pilot exciter* sebagai sumber daya medan *exciter* [3].

Regulator langsung mengontrol tegangan keluaran DC *exciter* ketika penyearah terkendali (thyristor) digunakan. Gambar 2.8 menunjukkan skema diagram dari sistem *alternator supplied controlled rectifier* yang mewakili sistem General Electric ALTHYREX². Regulator tegangan mengontrol sudut penyalan thyristor. *Exciter* alternator tereksitasi sendiri dan menggunakan regulator tegangan statis sendiri untuk mengatur tegangan keluarannya. Sistem menyediakan respon awal yang tinggi secara inheren akibat thyristor langsung mengontrol tegangan keluaran *exciter* [3].



Gambar 2.8 Sistem eksitasi *alternator-supplied controlled rectifier* [3]

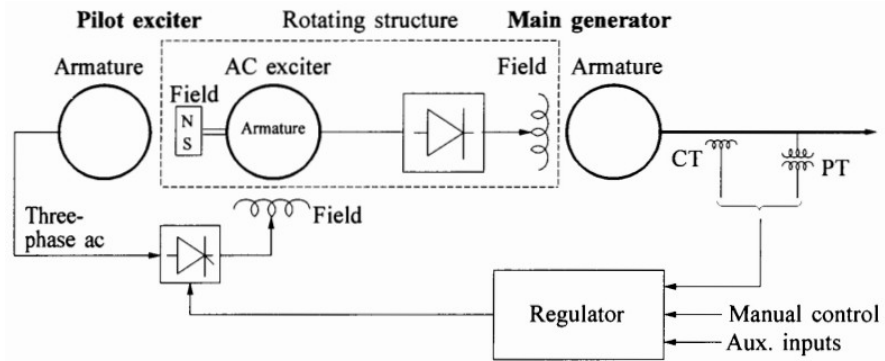
b. Sistem Penyearah Berputar

Kebutuhan atas cincin geser dan sikat-sikat pada sistem penyearah berputar telah tereliminasi dan arus DC langsung disuplai ke medan generator utama. Gambar 2.9 menunjukkan jangkar *exciter* AC dan penyearah diode berputar bersama dengan medan generator utama. Sebuah *pilot exciter* kecil dengan PMG (ditunjukkan sebagai N S pada Gambar 2.9) berputar dengan jangkar



ALTHYREX merupakan merek dagang dari General Electric Co.

exciter dan penyearah dioda. Keluaran penyearah dari *pilot exciter* stator mengaktifkan medan statis *exciter* AC yang berperan mengontrol medan generator utama [3].



Gambar 2.9 Sistem eksitasi *brushless* [3]

Persamaan (2.6) menunjukkan bahwa untuk membangkitkan ggl induksi diperlukan medan magnet pada rotor. Medan magnet pada kumparan rotor dibangkitkan dengan menyuplai arus searah (DC) yang umumnya disebut penguat atau eksitasi. Perangkat yang berfungsi untuk menyuplai arus penguat ini disebut eksiter (*exciter*) atau penguat.

Rotor adalah bagian dari mesin yang dipasang pada suatu poros dan berputar di dalam stator yang kosong. Lilitan pada rotor dinamakan lilitan medan (*field winding*) dan dicatu dengan arus DC. Gaya gerak magnet (ggm) yang sangat tinggi yang dihasilkan oleh arus dalam lilitan medan ini bercampur dengan ggm yang dihasilkan oleh arus dalam lilitan stator. Fluks resultan pada celah udara antara stator dan rotor membangkitkan tegangan dalam kumparan stator dan menyebabkan terjadinya momen putar (*torque*) antara stator dan rotor [4].

Bertambahnya arus eksitasi akan menyebabkan terjadinya peningkatan besar medan magnet pada rotor. Garis-garis gaya magnet yang menunjukkan adanya suatu pengaruh medan magnet disebut dengan fluks magnetik (ϕ). Hal ini berarti bahwa dengan meningkatnya arus eksitasi maka peningkatan fluks magnetik juga akan terjadi. Hubungan ini dapat dilihat pada persamaan (2.10), (2.11), dan persamaan (2.12).



$$\phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}} \quad (2.10)$$

$$\phi = \frac{\mu_0 N A I_f}{l} \quad (2.11)$$

$$\mathcal{F} = N I_f \quad (2.12)$$

dengan: ϕ = fluks (weber)

\mathcal{F} = gaya gerak magnet atau ggm (ampere-lilitan)

\mathcal{R} = reluktansi (ampere-lilitan/weber)

N = jumlah lilitan

I_f = arus eksitasi (ampere atau A)

Banyak referensi yang menunjukkan eksiter tersusun dari generator DC yang digerakkan oleh turbin (pada poros yang sama dengan generator) atau digerakkan oleh motor induksi. Sinyal dari sistem thyristor atau *rectifier* juga sering digunakan sebagai sinyal input *exciter* [5]. Penggunaan generator DC untuk menyuplai eksitasi termasuk jenis sistem eksitasi terpisah. Kelebihan dari penggunaan sumber eksitasi terpisah adalah daya DC yang harus disuplai lebih mudah diatur.

Sumber arus eksitasi dapat juga berasal dari sumber daya eksternal yang sudah tersedia tanpa harus menggunakan mesin bergerak sebagai *exciter*. Sumber ini dapat berasal dari penyedia layanan listrik (seperti PLN) untuk menyuplai eksitasi generator sinkron yang berkapasitas kecil. Generator sinkron ini biasanya digunakan untuk keperluan pengujian alat di dalam laboratorium. Sumber ini juga termasuk ke dalam jenis sistem eksitasi terpisah.

2.3 Sistem *Potential Source Rectifier Exciter*

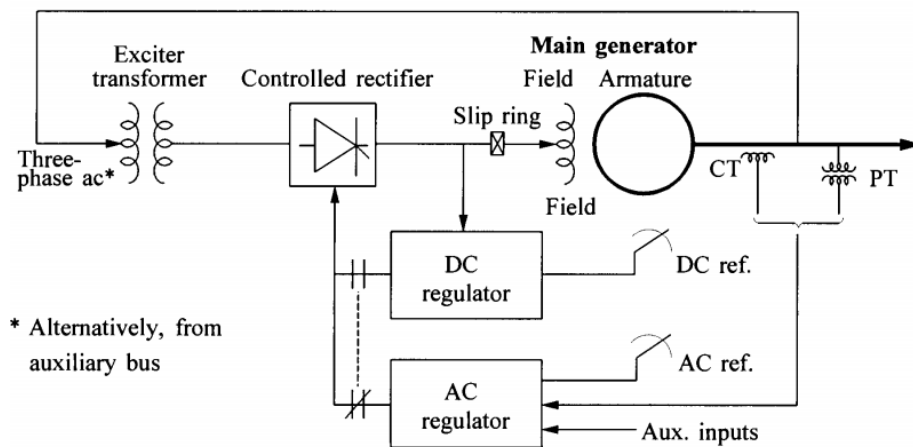
Salah satu jenis sistem eksitasi adalah sistem *potential source rectifier exciter* (PSRE). Sistem PSRE merupakan salah satu sistem eksitasi sendiri yang sumber daya eksitasi bersumber dari generator utama, bukan dari sumber eksternal.

Sistem PSRE merupakan jenis sistem eksitasi statis. Sistem PSRE menggunakan daya keluaran generator utama sebagai sumber eksitasi sendiri



dengan memanfaatkan *silicon controlled rectifier* (SCR). Sistem ini ditunjukkan pada Gambar 2.7. Rangkaian ini mempunyai kontroler tegangan statis. Kontrol tipe ini sangat cepat jika tidak ada delay waktu dalam proses sudut penyalan SCR [5].

Sistem ini memiliki konstanta waktu yang sangat kecil. Tegangan keluaran *exciter* maksimum (*ceiling voltage*) bergantung terhadap tegangan masukan AC. Selama kondisi gangguan sistem menyebabkan tegangan terminal generator tertekan, *ceiling voltage exciter* yang tersedia menjadi berkurang. Keterbatasan sistem eksitasi ini, sebagian besar diimbangi oleh respon yang hampir seketika dan kemampuan *post-fault field-forcing* yang tinggi. Sistem ini juga tidak mahal dan mudah dirawat. Sistem ini tersebut dapat bekerja dengan memuaskan jika generator terhubung dengan sistem daya yang besar.



Gambar 2.10 Sistem PSRE [3]

2.4 Silicon Controlled Rectifier

Silicon controlled rectifier (SCR) atau thyristor pertama kali diperkenalkan secara komersial pada tahun 1956. SCR memiliki kemampuan untuk mengendalikan Tegangan dan daya yang relatif tinggi dalam suatu tingkat kecil. Oleh karena itu SCR sering difungsikan sebagai sakelar (*switch*) ataupun pengendali (*controller*) dalam rangkaian elektronika yang menggunakan tegangan atau arus menengah-tinggi (*medium-high power*).



Beberapa aplikasi SCR di rangkaian elektronika diantaranya seperti rangkaian lampu dimmer, rangkaian logika, rangkaian osilator, rangkaian chopper, rangkaian pengendali kecepatan motor, rangkaian inverter, rangkaian *timer*, dan lain sebagainya [6].

Thyristor biasanya terdiri atas 3 terminal perangkat dengan 4 layer material tipe-n dan tipe-p secara bergantian (3 persambungan p-n) pada bagian pengaturan daya utamanya. Berbeda dengan hubungan linier yang ada antara beban dengan arus kontrol pada transistor, thyristor bersifat *bistable* (memiliki dua keadaan stabil). Terminal kontrol thyristor disebut elektroda *gate* (*G*) yang dimungkinkan terhubung ke struktur yang terintegrasi dan kompleks sebagai bagian dari perangkat. Dua terminal lainnya yakni anoda (*A*) dan katoda (*K*) mengontrol besar tegangan yang digunakan (sering dari kedua polaritasnya) dan melewatkan arus utama melalui thyristor. Terminal anoda dan katoda terhubung seri dengan beban yang akan dikontrol dayanya [6].

Thyristor digunakan untuk memperkirakan sakelar tertutup (tidak ada jatuh tegangan antara anoda dan katoda) atau terbuka (tidak ada arus anoda yang mengalir) untuk mengontrol aliran daya pada suatu rangkaian. Ini berbeda dengan rangkaian penyakelaran digital level rendah yang di desain untuk mengirim dua level tegangan kecil yang berbeda sementara melewatkan arus kecil (idealnya adalah nol). Rangkaian elektornika daya harus memiliki kapabilitas untuk mengirim arus yang besar dan dapat menahan tegangan besar eksternal yang digunakan. Semua tipe thyristor dapat dikontrol pada *switching* dari keadaan *forward-blocking* (potensial positif diaplikasikan pada anoda terhadap katoda dengan aliran arus anoda yang kecil) ke keadaan *forward-conduction* (arus maju anoda besar mengalir dengan jatuh tegangan yang kecil pada anoda-katoda) [6].

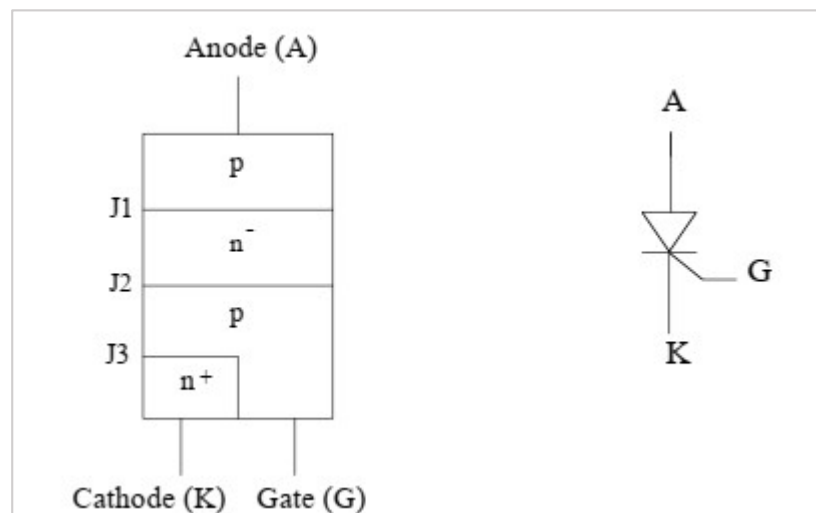
Kebanyakan thyristor memiliki karakteristik yakni sinyal *gate* dapat dihilangkan dan thyristor akan tetap berada dalam keadaan *forward-conduction* ah *switching* dari keadaan keadaan *forward-blocking* ke keadaan *forward-uction*. Sifat ini disebut "*latching*" yang merupakan perbedaan antara stor dengan perangkat elektornika daya yang lainnya. Beberapa thyristor



juga dapat dikontrol kembali dari keadaan *forward-conduction* ke keadaan *forward-blocking*. Desain khusus dari suatu thyristor akan menentukan kemampuannya untuk dikontrol dan seringnya digunakan [6].

2.4.1 Struktur dan Operasi Dasar

Gambar 2.11 menunjukkan tampilan konseptual dari suatu thyristor tertentu dengan 3 persambungan p-n dan elektroda eksternal yang diberikan label. Gambar 2.11 juga menunjukkan simbol rangkaian thyristor yang digunakan pada rangkaian listrik [6].



Gambar 2.11 Rangkaian dalam dan simbol thyristor [6]

Suatu wilayah yang memiliki resistivitas tinggi yakni *n-base* ada di setiap thyristor. Wilayah *n-base* dan terkait persambungan J_2 pada Gambar 2.8 harus mendukung tegangan maju besar yang diaplikasikan yang terjadi ketika *switch* pada kondisi off atau keadaan *forward-blocking* (tidak kondukt). *n-base* biasanya di doping dengan impuritas dari atom fosfor pada konsentrasi 10^{14} cm^{-3} . Ketebalan *n-base* dapat mencapai 10 sampai 100 μm untuk mendukung tegangan yang besar. Thyristor tegangan tinggi umumnya terbuat dari difusi aluminium atau gallium ke dalam kedua permukaan untuk menghasilkan persambungan yang dalam dengan *n-base*. Profil doping dari *p-regions* berkisar antara



10^{15} sampai 10^{17} cm^{-3} . Ketebalan *p-regions* dapat ditingkatkan sampai $10 \mu\text{m}$. Wilayah katoda (biasanya ketebalan hanya beberapa μm) dibuat dengan menggunakan atom fosfor dengan kerapatan doping antara 10^{17} sampai 10^{18} cm^{-3} [6].

Tingkatan tegangan *forward-blocking* tertinggi dari thyristor maka wilayah *n-base* juga harus lebih tebal. Penambahan ketebalan dari wilayah resistivitas tinggi, dampaknya pada lebih lambatnya dalam meng-on-kan dan meng-off-kan (waktu *switching* lebih lama dan atau frekuensi lebih rendah dari siklus *switching* karena banyak menyimpan muatan selama konduksi). Contohnya, sebuah perangkat diinginkan memiliki *rating* tegangan *forward-blocking* 1 kV, dengan konstruksi fisiknya, *switch* lebih lambat dibandingkan yang satunya dengan *rating* 100 V. Tambahan, wilayah resistivitas tinggi yang lebih tebal akan menyebabkan jatuh tegangan maju yang besar saat konduksi daripada perangkat 100 V yang membawa arus yang sama. Atom impuritas seperti platina atau emas, atau penyinaran elektron digunakan untuk membuat tempat rekombinasi pembawa muatan pada thyristor [6].

Jumlah tempat rekombinasi mereduksi rata-rata waktu hidup pembawa (waktu rata-rata sebuah elektron atau *hole* berpindah melalui Si sebelum berekombinasi dengan tipe pembawa muatan berlawanan). Reduksi waktu hidup pembawa memperpendek waktu *switching* (khususnya saat *turn-off* atau waktu pemulihan) pada harga dari penambahan jatuh tegangan *forward-conduction*. Efek lain yang ada berkaitan dengan ketebalan relatif dan tampilan dari variasi wilayah yang membentuk thyristor modern, tetapi *trade-off* utama antara tingkatan tegangan *forward-blocking* dan jatuh tegangan maju selama konduksi seharusnya tetap diingat dengan baik [6].

Operasi thyristor adalah seperti berikut. Tegangan positif yang diaplikasikan pada anoda (terhadap katoda) membuat thyristor berada pada keadaan *forward-blocking*. Persambungan tengah J_2 (lihat Gambar 2.11) bias mundur (*reverse-biased*). Pada mode operasi ini, arus *gate*



ditahan pada angka nol (rangkaiannya terbuka). Pada praktiknya, elektroda *gate* di bias ke tegangan negatif kecil (terhadap katoda) untuk membias mundur persambungan GK J_3 dan mencegah pembawa muatan ternjeksi ke *p-base*. Hanya arus bocor pada kondisi ini yang dibangkitkan akibat panas melalui perangkat dan sering diperkirakan bernilai nol (nilai aktual dari arus bocor biasanya banyak permintaannya magnituda lebih rendah daripada arus konduksi pada keadaan on. Selama tegangan maju yang diaplikasikan tidak melebihi nilai yang diperlukan untuk menyebabkan berlebuhnya penggandaan pembawa di daerah deplesi sekitar J_2 (*avalanche breakdown*), thyristor akan tetap berada pada kondisi off (*forward-blocking*). Tegangan yang melebihi tegangan *forward-blocking* maksimum thyristor akan membuat thyristor menjadi on. Mode on ini menyebabkan ketidakseragaman pada aliran arus, umumnya merusak dan seharusnya dihindari [6].

Arus positif *gate* yang diinjeksikan ke perangkat J_3 menjadi bias maju membuat elektron diinjeksikan dari *n-emitter* ke dalam *p-base* dan terkumpul di *n-base*. Beberapa elektron ini berdifusi melewati *p-base* dan terkumpul di *n-base*. Pengumpulan muatan ini menyebabkan perubahan kondisi bias J_1 . Perubahan bias J_1 menyebabkan *hole* yang diinjeksikan dari *p-emitter* ke *n-base*. *Hole* berdifusi melewati *n-base* dan terkumpul di *p-base*. Tambahan dari pengumpulan ini *holes* di *p-base* bertindak sama seperti arus *gate* [6].

Seluruh proses bersifat regeneratif dan akan menyebabkan penambahan pembawa muatan sampai J_2 juga menjadi bias maju dan thyristor menjadi terkunci pada *on-state* (*forward conduction*). Aksi regeneratif akan terjadi selama arus *gate* diaplikasikan pada jumlah yang cukup dan lama waktu yang cukup. Mode *turn-on* ini dianggap sebagai salah satu hal yang diinginkan karena dikontrol oleh sinyal *gate* [6].

Cara lain untuk menjadikan thyristor berpindah dari keadaan *forward-blocking* menjadi *forward-conduction* juga ada. J_2 mengalami bias mundur di bawah tegangan maju yang diaplikasikan pada mode



blocking. Persambungan bias mundur J_2 merupakan kapasitansi dominan dari ketiganya dan menentukan arus perpindahan yang mengalir. Jika tingkat dari peningkatan v_{AK} yang diaplikasikan cukup (dv_{AK}/dt), maka akan menyebabkan arus perpindahan signifikan melalui kapasitansi J_2 . Arus pemindahan ini dapat menginisiasi *switching* yang mirip dengan diaplikasikannya arus *gate* eksternal. Fenomena dinamis ini terdapat pada semua thyristor dan dapat menyebabkan ada limit (dv/dt) terhadap *rating* waktu dari v_{AK} yang diaplikasikan yang dapat ditempatkan pada perangkat untuk menghindari *switching* yang tidak terkontrol. Perubahan struktur dasar thyristor dapat meningkatkan batas dv/dt [6].

Sekali thyristor berpindah ke *forward conduction*, arus *gate* menjadi tidak berguna. Thyristor terkunci dan untuk SCR tidak dapat kembali ke mode *blocking* dengan menggunakan terminal *gate*. Arus anoda harus dikomutasi menjauhi SCR untuk waktu yang cukup untuk mengizinkan muatan yang tersimpan pada perangkat dapat berekombinasi. Hanya setelah waktu pemulihan telah terjadi maka tegangan maju dapat diaplikasikan kembali (dibawah batas dv/dt) dan SCR akan dioperasikan kembali pada keadaan *forward-blocking*. Jika tegangan maju diaplikasikan kembali sebelum waktu pemulihan cukup telah berlalu, SCR kembali akan berada pada keadaan *forward-conduction* [6].

2.4.2 Kurva Karakteristik SCR

Suatu plot dari arus anoda (i_A) sebagai fungsi dari tegangan anoda-katoda (v_{AK}) ditunjukkan pada Gambar 2.12. Mode *forward-blocking* ditunjukkan sebagai bagian arus rendah dari grafik (kurva padat di sekitar titik operasi “1”). Arus *gate* yang bernilai nol dan v_{AK} positif sebagai karakteristik maju pada *off-state* atau *blocking-state* ditentukan oleh persambungan tengah J_2 yang merasakan bias mundur. Titik operasi “1” menunjukkan bahwa arus yang sangat kecil mengalir

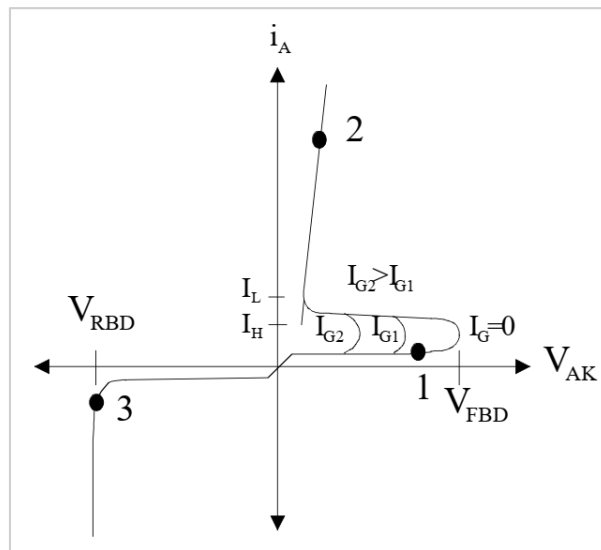


melalui perangkat. Jika tegangan yang diaplikasikan melebihi tegangan *forward-blocking*, thyristor akan menjadi *on-state* atau *conducting-state* (ditunjukkan pada titik operasi “2”) [6].

Efek dari arus *gate* lebih rendah daripada tegangan *blocking* pada proses *switching* terjadi. Thyristor berpindah dengan cepat sepanjang bagian negatif yang melandai dari kurva sampai mencapai titik operasi stabil yang ditentukan oleh rangkaian eksternal (titik “2”). Bagian grafik mengindikasikan konduksi maju menunjukkan nilai yang besar dari i_A yang memungkinkan terkonduksi pada nilai rendah v_{AK} relatif, mirip dengan dioda daya [6].

Thyristor yang berpindah dari *forward-blocking* ke *forward-conduction* menyebabkan rangkaian eksternal harus mengizinkan arus anoda yang cukup mengalir untuk menjaga perangkat tetap terkunci (*latched*). Arus anoda minimum yang akan menyebabkan perangkat tetap pada keadaan *forward-conduction* karena berpindah dari keadaan *forward-blocking* disebut dengan *latching current* I_L . Jika thyristor telah berada pada keadaan *forward-conduction* dan arus anoda berkurang, perangkat dapat memindahkan mode operasinya dari mode *forward-conduction* kembali menjadi *forward-blocking*. Nilai minimum arus anoda yang dibutuhkan untuk menjaga perangkat tetap berada pada kondisi *forward-conduction* setelah beroperasi pada nilai arus anoda yang tinggi disebut dengan *holding current* I_H . Nilai dari *holding current* lebih rendah dibandingkan dengan nilai *latching current* seperti yang diindikasikan pada Gambar 2.12 [6].





Gambar 2.12 Kurva karakteristik $i-v$ thyristor [6]

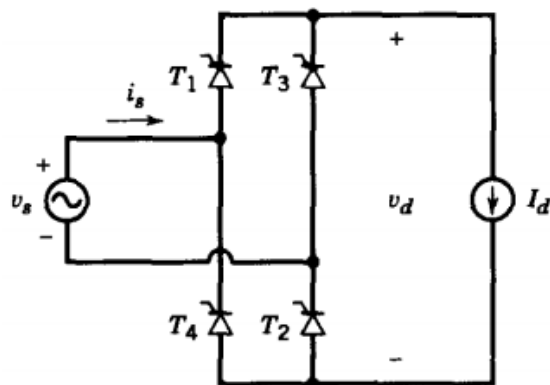
Karakteristik bias mundur thyristor pada kuadran III Gambar 2.12 ditentukan oleh persambungan bagian luar (J_1 dan J_3) yang dibias mundur pada mode operasi ini (v_{AK} dijadikan negatif). Thyristor simetris di desain agar J_1 akan mencapai *reverse breakdown* akibat perkalian pembawa pada potensial mundur yang diaplikasikan yang dekat dengan nilai *forward breakdown* (titik operasi “3” Gambar 2.9). Persambungan *forward-blocking* dan *reverse-blocking* biasanya difabrikasi bersamaan dengan proses difusi yang lama (10 sampai 50 jam) pada suhu tinggi (>1200 °C). Proses ini memproduksi properti *blocking* yang simetris. Proses terminasi *wafer-edge* menyebabkan kapabilitas *forward-blocking* berkurang sampai sekitar 90% dari kapabilitas *reverse-blocking*. Perangkat yang tidak simetris dibuat untuk mengoptimalkan *forward-conduction* dan properti *turn-off*-nya dan dengan demikian mencapai *reverse breakdown* pada tegangan jauh lebih kecil daripada yang diaplikasikan pada arah maju. Ini dicapai dengan mendesain thyristor asimetris dengan *n-base* yang jauh lebih tipis daripada yang digunakan pada struktur simetris. *N-base* tipis mengarah pada properti yang lebih baik seperti *forward drop* dan waktu *switching* lebih pendek. Perangkat asimetris umumnya digunakan



hanya ketika tegangan maju (v_{AK} positif) diaplikasikan (termasuk pada banyak desain inverter) [6].

2.5 Single-Phase Full Wave Controlled Rectifier

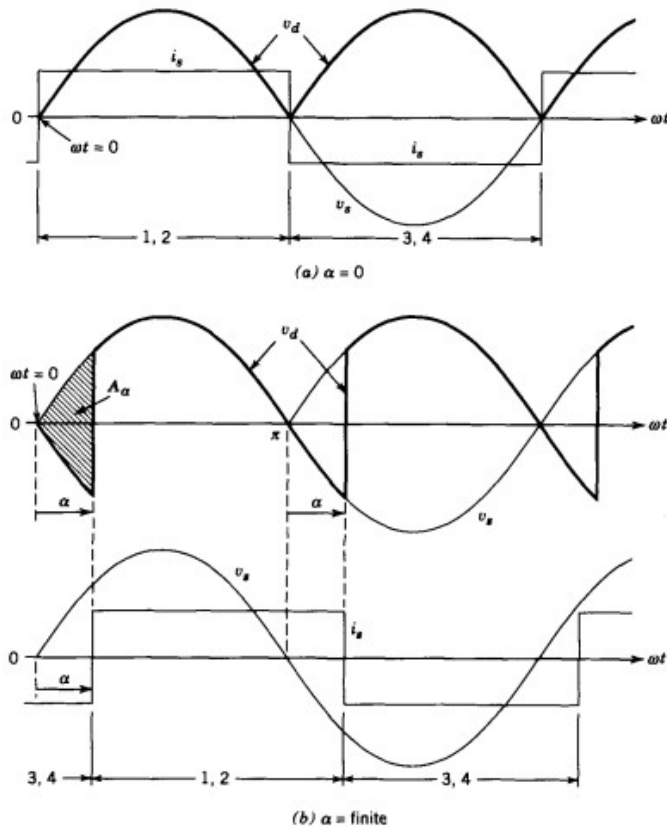
Pada rangkaian *single-phase full wave controlled rectifier* dengan asumsi bahwa induktansi sumber adalah nol ($L_s = 0$) dan arus dc murni $i_d(t) = I_d$ ditunjukkan pada Gambar 2.13. Arus I_d mengalir melalui satu thyristor dari grup atas (thyristor 1 dan 3) dan satu thyristor di grup bawah (thyristor 2 dan 4). Arus *gate* thyristor yang diaplikasikan secara berkelanjutan menyebabkan thyristor pada Gambar 2.13 akan menjadi seperti dioda dan operasinya juga akan mirip seperti dioda (pada *uncontrolled rectifier*). Bentuk gelombang dan arus pada kondisi tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.14 [7].



Gambar 2.13 Rangkaian *single-phase full wave controlled rectifier* [7]

Konduksi natural thyristor didasarkan pada segeranya thyristor mulai terkonduksi jika arus *gate* diaplikasikan secara berkesinambungan (atau seolah-olah sebagai dioda). Gambar 2.14a menunjukkan konduksi natural instan terjadi saat $\omega t = 0$ untuk thyristor 1 dan 2 serta $\omega t = \pi$ untuk thyristor 3 dan 4 [7].





Gambar 2.14 Gelombang dari rangkaian pada Gambar 2.10 [7]

Efek dari penggunaan pulsa-pulsa arus *gate* yang ditunda dengan sudut α (disebut sebagai sudut tunda atau sudut penyalaan) selanjutnya dibandingkan terhadap konduksi natural instannya. Pada saat $\omega t = 0$, arus mengalir melalui thyristor 3 dan 4 serta $v_d = -v_s$. Seperti pada Gambar 2.14b, tegangan pada thyristor 1 menjadi *forward biased* setelah $\omega t = 0$, tetapi thyristor tersebut tidak mengalirkan arus sampai $\omega t = \alpha$ hingga arus *gate* diberikan. Situasi ini identik dengan thyristor 2. v_d menjadi negatif selama interval 0 sampai α sebagai konsekuensi dari sudut tunda terbatas α (Gambar 2.14a, $\alpha = 0$) [7].

Arus komutasi dari thyristor 3 dan 4 ke thyristor 1 dan 2 mengalir seketika pada saat $\omega t = \alpha$ karena asumsi bahwa $L_s = 0$. Ketika thyristor 1 dan 2 terkonduksi, $v_d = v_s$. Arus thyristor 1 dan 2 terkonduksi sampai $\pi + \alpha$ ketika thyristor 3 dan 4 terpicu dan ditunda dengan sudut α terhadap konduksi natural



instan mereka ($\omega t = \pi$). Komutasi yang mirip pada arus terjadi dari thyristor 1 dan 2 ke thyristor 3 dan 4 [7].

Perbandingan antara efek dari sudut tunda α pada gelombang v_d di Gambar 2.14b dengan 2.14a menunjukkan bahwa nilai rata-rata V_d dari tegangan dc dapat dikontrol dengan sudut tunda. Pernyataan V_d dapat diperoleh dari:

$$\begin{aligned} V_{da} &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{2} V_s \sin \omega t d(\omega t) \\ &= \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_s \cos \alpha \\ &= 0,9 V_s \cos \alpha \end{aligned} \quad (2.13)$$

V_{d0} menjadi nilai rata-rata tegangan dc pada Gambar 2.14a dengan $\alpha = 0$ dan ($L_s = 0$), dimana:

$$\begin{aligned} V_{d0} &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} V_s \sin \omega t d(\omega t) \\ &= \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_s \\ &= 0,9 V_s \end{aligned} \quad (2.14)$$

Kemudian, jatuh pada tegangan rata-rata ke α adalah

$$\begin{aligned} \Delta V_{da} &= V_{d0} - V_{da} \\ &= 0,9 V_s (1 - \cos \alpha) \end{aligned} \quad (2.15)$$

Tegangan jatuh tanpa kerugian pada V_d sama dengan are volt-radian A_α yang ditunjukkan pada Gambar 2.14b dibagi dengan π [7].

Daya rata-rata yang melewati konverter dapat dihitung sebagai:

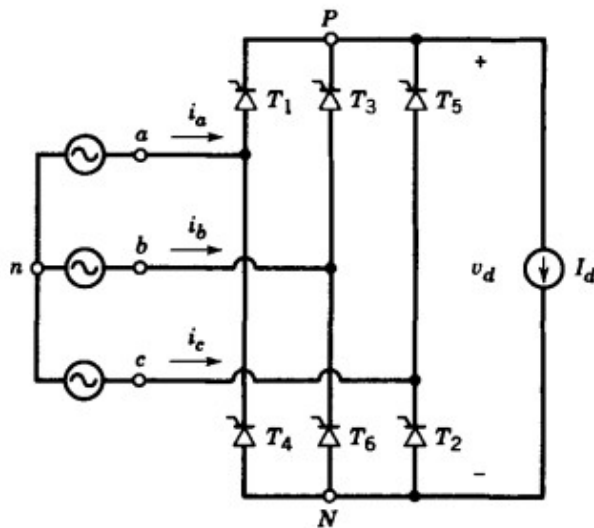
$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T v_d i_d dt \end{aligned} \quad (2.16)$$

gan suatu arus dc konstan ($i_d = I_d$), maka:



$$\begin{aligned}
 P &= I_d \left(\frac{1}{T} \int_0^T v_d dt \right) \\
 &= I_d V_d \\
 &= 0,9 V_s I_d \cos \alpha
 \end{aligned}
 \tag{2.17}$$

2.6 Three-Phase Full Wave Controlled Rectifier

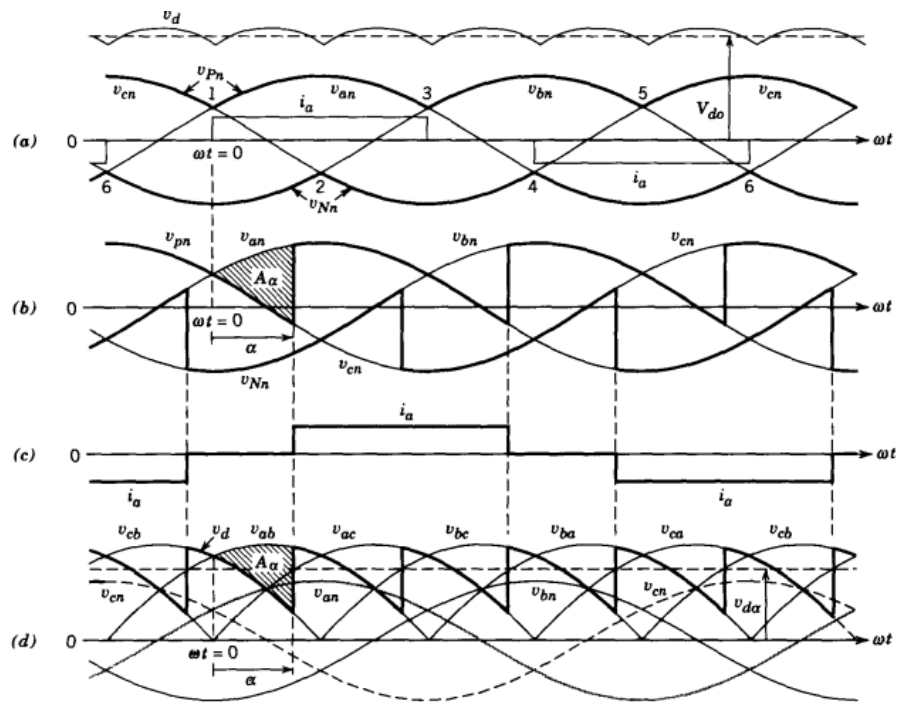


Gambar 2.15 Rangkaian *three-phase full wave controlled rectifier* [7]

Salah satu jenis rangkaian penyearah terkendali adalah *three-phase full wave controlled rectifier* atau penyearah terkendali gelombang penuh tiga fasa merupakan konverter yang terdiri atas rangkain enam SCR yang digunakan untuk mengonversi sinyal AC tiga fasa gelombang penuh menjadi sinyal DC yang memungkinkan pengaturan pada tegangan keluarannya.

Gambar 2.15 menunjukkan arus i_d mengalir melalui salah satu thyristor dari grup atas (thyristor T1, T3, dan T5) dan salah satu dari thyristor grup bawah (T2, T4, dan T6). Jika arus diaplikasikan secara terus-menerus, thyristor pada Gambar 2.12 akan memiliki sifat dan operasi yang mirip dengan dioda. Pada kondisi ini ($\alpha = 0$), tegangan dan arus pada fasa a ditunjukkan pada Gambar 2.16 [7].





Gambar 2.16 Gelombang dari rangkaian pada Gambar 2.10 [7]

Tegangan rata-rata DC V_{d0} diperlihatkan pada persamaan (2.18) seperti berikut.

$$\begin{aligned}
 V_{d0} &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \\
 &= 1,35 V_{LL}
 \end{aligned}
 \tag{2.18}$$

Kecepatan konduksi alami suatu thyristor didasarkan pada segeranya thyristor mulai terkonduksi jika arus gerbangnya (*gate*) diaplikasikan secara terus-menerus. Kecepatan konduksi alami untuk thyristor yang bervariasi ditunjukkan pada Gambar 2.16a oleh 1, 2, Efek dari sudut penyalan atau sudut tunda α pada gelombang konverter yang ditunjukkan pada Gambar 2.16b melalui d . Berfokus pada arus komutasi dari thyristor 5 ke 1, terlihat bahwa thyristor 5 tetap terkonduksi sampai $\omega t = \alpha$ dengan kecepatan arus atasnya segera ke thyristor 1 karena nilai L_s (sifat induktif pada sumber) dengan nol. Arus pada fasa a ditunjukkan pada Gambar 2.16c. Penundaan sama oleh suatu sudut α terjadi pada konduksi thyristor yang lain.



Tegangan *line-to-line* AC (V_{LL}) dan tegangan keluaran DC v_d ($v_d = V_{Pn} - V_{Nn}$) ditunjukkan pada Gambar 2.16d [7].

Pernyataan tentang tegangan DC rata-rata dapat dipenuhi dari gelombang pada Gambar 2.16b dan d. Area *volt-second* A_α (setiap 60°) menghasilkan pengurangan tegangan DC rata-rata dengan suatu sudut tunda α yang dibandingkan dengan V_{d0} pada Gambar 2.16a, sehingga,

$$V_{da} = V_{d0} - \frac{A_\alpha}{\pi/3} \quad (2.19)$$

Area *volt-radian* A_α yang ditunjukkan pada Gambar 2.16d merupakan integral dari $v_{an} - v_{cn}$ ($= v_{ac}$). Hal ini dapat dikonfirmasi pada Gambar 2.16d dimana A_α merupakan integral dari $v_{ab} - v_{cb}$ ($= v_{ac}$). Waktu asli yang dipilih pada Gambar 2.16,

$$v_{ac} = \sqrt{2} V_{LL} \sin \omega t \quad (2.20)$$

Oleh karena itu,

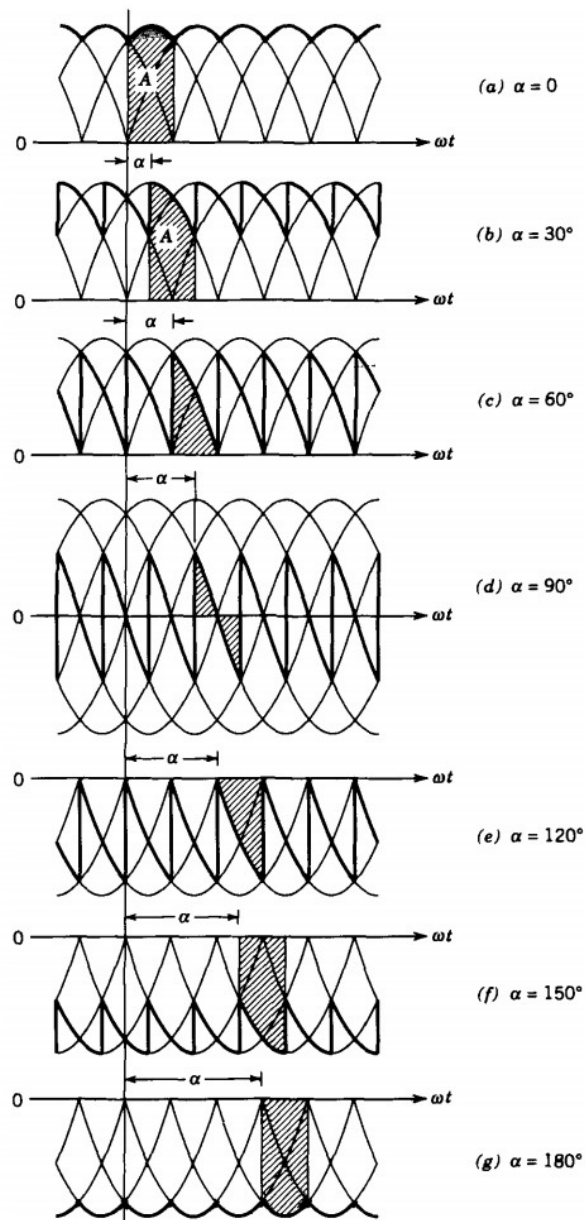
$$\begin{aligned} A_\alpha &= \int_0^\alpha \sqrt{2} V_{LL} \sin \omega t d(\omega t) \\ &= \sqrt{2} V_{LL} (1 - \cos \alpha) \end{aligned} \quad (2.21)$$

Selanjutnya, mensubstitusi A_α pada persamaan (2.21) dan menggunakan persamaan (2.19) untuk menghasilkan,

$$\begin{aligned} V_{da} &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \cos \alpha \\ &= 1,35 V_{LL} \cos \alpha \\ &= V_{d0} \cos \alpha \end{aligned} \quad (2.22)$$

Prosedur untuk menghasilkan V_{da} di atas mudah ketika $\alpha < 60^\circ$. Untuk $\alpha > 60^\circ$, diperoleh hasil yang sama tetapi turunan alternatif lebih mudah [7].





Gambar 2.17 Gelombang tegangan keluaran *three-phase full wave controlled rectifier* untuk beberapa nilai α [7]

Persamaan (2.22) memperlihatkan bahwa V_{da} tidak bergantung pada besarnya arus I_d selama i_d mengalir terus-menerus. Gelombang tegangan DC untuk nilai yang bervariasi dari α ditunjukkan pada Gambar 2.17 [7]. Daya

rata adalah

$$\begin{aligned}
 P &= V_d \times I_d \\
 &= 1,35 V_{LL} I_d \cos \alpha
 \end{aligned}
 \tag{2.23}$$

