

Integrasi Filter Daya Aktif dan Transfer Energi Surya dengan Menggunakan Inverter

Buku ini berisi tentang penelitian konverter elektronika daya yang bekerja sebagai *current controlled voltage source inverter* (CC-VSI). CC-VSI berfungsi sebagai filter daya aktif tipe paralel dan sekaligus pengatur aliran daya aktif dari panel surya ke *grid*. Sisi AC dari CC-VSI terhubung ke *grid* sedangkan sisi DC terpasang panel PV sebagai sumber tegangan tak bebas. Strategi pengendaliannya yaitu keseimbangan daya aktif dengan mengendalikan arus *grid* secara langsung. Kombinasi sistem ini dibuat model dan pengujiannya dalam PSIM. Selain itu dibuat rangkaian MPPT untuk mendukung kerja panel PV. Ada empat algoritma MPPT untuk sistem ini yaitu algoritma *Look-up Table*, algoritma *Hill Climbing*, algoritma Pencarian Fibonacci, dan algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO). Keluaran rangkaian MPPT adalah tegangan DC yang menentukan nilai tegangan referensi DC-bus yang berarti juga nilai tegangan keluaran panel surya. Dengan mengembangkan rangkaian inverter (dalam hal ini untuk sistem tiga fasa) yang dimanfaatkan sebagai pengirim daya aktif dan filter daya aktif, kuantitas dan kualitas daya listrik pada jaringan listrik dapat ditingkatkan. Dengan demikian studi ini dapat membantu mengatasi krisis energi dewasa ini.



Ir. Hanny H Tumbelaka, M.Sc., Ph.D mendapatkan gelar Ir. (Teknik Elektro) dari Universitas Kristen Petra, Indonesia pada tahun 1988, M.Sc (Electric Power Engineering) dari Rensselaer Polytechnic Institute, New York, USA (1993), dan Ph.D (Electrical Engineering) dari Curtin University of Technology, Western Australia (2006). Dari tahun 1989 sampai sekarang menjadi dosen di Program Studi Teknik Elektro, Universitas Kristen Petra, Indonesia dan sudah tersertifikasi. Pernah menjadi *Research Fellow* di Sophia University, Jepang dengan dana dari Sophia University, Jepang (2008) dan di National Renewable Energy Laboratory (NREL), Colorado, USA dengan dana Fulbright, USA (2016).

Bidang penelitian adalah elektronika daya, *power quality* dan *renewable energy*. Koordinator Kelompok Studi Electric Power & Energy Management System (EP&EMS), Universitas Kristen Petra, Indonesia. Menjadi anggota PII (IPM) dan IEEE (Member).

Penerbit:
Lembaga Penelitian dan Pengabdian
Kepada Masyarakat (LPPM)
Petra Press
Universitas Kristen Petra
Jl. Siwalankerto 121-131
Surabaya 60236, Indonesia



Petra Press

Integrasi Filter Daya Aktif dan Transfer Energi Surya dengan Menggunakan Inverter

Hanny H. Tumbelaka

Integrasi Fiter Daya Aktif dan Transfer Energi Surya dengan Menggunakan Inverter

Hanny H. Tumbelaka

Petra Press

Integrasi Filter Daya Aktif dan Transfer Energi Surya dengan Menggunakan Inverter

Hanny H. Tumbelaka



Petra Press

Integrasi Filter Daya Aktif dan Transfer Energi Surya dengan Menggunakan Inverter/
Hanny H. Tumbelaka, Edisi Pertama
Surabaya, Bagian Penerbit Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat,
Universitas Kristen Petra, 2017

ISBN: 978-602-5446-03-0

Kutipan Pasal 44

1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak mengumumkan atau memperbanyak suatu ciptaan atau memberi ijin untuk itu, dipidana paling lama 7 (tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak Rp 100.000.000,- (seratus juta rupiah)
2. Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum dalam ayat (1) dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp 50.000.000,- (lima puluh juta rupiah)

**INTEGRASI FILTER DAYA AKTIF DAN TRANSFER ENERGI SURYA DENGAN
MENGUNAKAN INVERTER**

Cetakan Pertama, Oktober 2017

Penulis:

Hanny H. Tumbelaka

@Hak cipta ada pada penulis

Hak penerbit pada penerbit

Tidak boleh diproduksi sebagian atau seluruhnya dalam bentuk apapun tanpa seijin tertulis dari pengarang dan/atau penerbit

Penerbit:

Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat

Petra Press

Universitas Kristen Petra

Jl. Siwalankerto 121-131, Surabaya 60236

Telp. 031-2983138, 2983147; Fax. 031-2983111

Kata Pengantar

Puji syukur kepada Tuhan Yesus Kristus bahwa buku yang berjudul **Integrasi Filter Daya Aktif dan Transfer Energi Surya dengan Menggunakan Inverter** telah berhasil diselesaikan. Buku ini merupakan hasil penelitian yang sudah lama ditekuni, termasuk dalam studi pascasarjana dan *postdoctoral*. Tujuan dipublikasikan buku ini untuk membagikan pengetahuan tentang teknologi ini kepada para peneliti, dosen, praktisi dan mahasiswa dibidang elektronika daya dan energi terbarukan khususnya di Indonesia. Diharapkan buku ini dapat dipakai sebagai referensi untuk pengembangan aplikasi elektronika daya dan solar sel.

Penulis mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang membantu terwujudnya penerbitan buku ini. Penulis juga menyadari bahwa buku ini belum sempurna, karena itu komentar, umpan balik dan sumbangan pemikiran sangat diharapkan.

Surabaya, 1 Oktober 2017

Hanny H. Tumbelaka, Ph.D

Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Industri
Universitas Kristen Petra
Surabaya, Indonesia.

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL	xi
1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Signifikansi dan Kontribusi.....	4
2 SEKILAS INVERTER TIGA FASA.....	7
2.1 Klasifikasi berdasarkan Sumber listrik DC.....	9
2.2 Klasifikasi berdasarkan Rangkaian VSI.....	11
2.3 Klasifikasi berdasarkan Sistem Kendali.....	14
3 FILTER DAYA AKTIF.....	17
3.1 Masalah Kualitas Daya Listrik (Harmonisa).....	17
3.2 Mengatasi Masalah Harmonisa.....	19
3.3 Berbagai Strategi Kompensasi Harmonisa.....	23
3.4 Konfigurasi Filter Daya Aktif (APF) Tipe Paralel dengan pengendalian arus grid secara langsung.....	26
3.4.1 Induktor Seri.....	27
3.4.2 Pengendalian Langsung Arus Grid.....	29
3.5 Loop Kendali Arus.....	30
3.5.1 Kondisi untuk Beroperasi.....	31
3.5.2 Kondisi untuk Dapat Dikendalikan.....	33
3.6 Loop Kendali Tegangan.....	34

3.6.1	Sistem Pengendalian Tegangan DC-bus.....	34
3.6.2	Penentuan Arus Referensi.....	36
3.7	Hasil Simulasi dan Evaluasi Sistem.....	41
4	TRANSFER ENERGI SURYA.....	51
4.1	Voltage Source Inverter (VSI) Tiga Fasa.....	51
4.2	Model Sederhana Panel Surya (Photovoltaic – PV).....	52
4.3	Model Terintegrasi.....	56
4.4	Maximum Power Point Tracking (MPPT) untuk panel surya (PV).....	58
4.4.1	Algoritma Look-up Table.....	58
4.4.2	Algoritma Hill Climbing.....	60
4.4.3	Algoritma Pencarian Fibonacci.....	61
4.4.4	Algoritma Particle Swarm Optimization (PSO).....	64
4.5	Hasil Simulasi dan Evaluasi Sistem.....	66
4.5.1	Algoritma Look-up Table.....	67
4.5.2	Algoritma Hill Climbing.....	71
4.5.3	Algoritma Pencarian Fibonacci.....	75
4.5.4	Algoritma Particle Swarm Optimization (PSO).....	79
5	KESIMPULAN.....	88
	INDEX.....	91

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Line-commutated inverter	9
Gambar 2.2.	CSI dengan GTO.....	10
Gambar 2.3.	VSI dengan MOSFET dan Dioda anti-paralel	11
Gambar 2.4.	Gelombang tegangan (atas) dan arus (bawah) dari Multi-level Inverter (MLI).....	12
Gambar 2.5.	Berbagai Konfigurasi Rangkaian VSI 3 fasa dengan IGBT dan Dioda anti-paralel	13
Gambar 3.1.	Model rangkaian sumber harmonisa: a) sumber tegangan, b) sumber arus	18
Gambar 3.2.	APF tipe seri	21
Gambar 3.3.	APF tipe paralel.....	21
Gambar 3.4.	Diagram blok dari metoda IPC dengan teori p-q	25
Gambar 3.5.	Konfigurasi Filter Daya Aktif (APF) tipe paralel dengan pengendalian arus grid secara langsung	27
Gambar 3.6.	Rangkaian ekuivalen untuk harmonisa	29
Gambar 3.7.	Kerja kendali arus (tracking) dengan PRCC	31
Gambar 3.8.	Loop kendali tegangan.....	35
Gambar 3.9.	Kendali keseimbangan daya aktif	39
Gambar 3.10.	Perubahan beban; (a) arus beban fasa-A (b) arus grid fasa-A	40
Gambar 3.11.	Proses keseimbangan daya aktif; (a) tegangan DC-bus (b) keluaran rangkaian kontrol PI.....	40
Gambar 3.12.	Tegangan grid tiga fasa.....	41
Gambar 3.13.	Arus beban (fasa a, b, c) dan arus netral	43
Gambar 3.14.	Arus grid (fasa a, b, c) dan arus netral	44
Gambar 3.15.	Spektrum harmonisa dari arus grid (fasa a, b, c).....	45

Gambar 3.16.	Arus keluaran (fasa a, b, c dan netral) CC-VSI.....	45
Gambar 3.17.	Tegangan dan arus grid (fasa A)	46
Gambar 4.1.	Rangkaian VSI tiga-fasa empat-kawat	51
Gambar 4.2.	Model sederhana Panel Surya sesuai persamaan (4.4)	53
Gambar 4.3.	Kurva p-v dari model panel surya pada gambar 4.2	54
Gambar 4.4.	Model Terintegrasi (APF dan panel PV).....	57
Gambar 4.5.	Proses Pencarian Titik Maksimum dengan Fibonacci.....	62
Gambar 4.6.	Beberapa MPP Lokal karena panel PV terhalang sebagian	64
Gambar 4.7.	Proses Pencarian Titik Maksimum oleh Agen dengan PSO	65
Gambar 4.8.	Tegangan (atas) dan daya keluaran maksimum (bawah) panel PV ($p_p = 0.8\text{kW/m}^2$)	68
Gambar 4.9.	Arus grid dan arus beban (fasa A) (atas); Arus grid tiga fasa (tengah); Tegangan grid (fasa A) (bawah).....	68
Gambar 4.10.	Tegangan dan daya keluaran panel PV (atas) pada tingkat radiasi sama dengan nol; Arus grid dan arus beban (bawah)	69
Gambar 4.11.	Tegangan (atas) dan daya keluaran (tengah) panel PV, dan arus grid (fasa A)(bawah) ketika tingkat radiasi matahari berubah.....	70
Gambar 4.12.	Variabel keluaran panel PV: ΔV ; Tegangan keluaran PV; ΔP ; Daya keluaran PV (gambar dari atas ke bawah).....	72
Gambar 4.13.	Arus grid dan arus beban (atas); Arus grid tiga fasa (tengah); Tegangan grid (fasa A) (bawah)	73

Gambar 4.14.	Tegangan dan daya keluaran panel PV (atas) pada tingkat radiasi sama dengan nol; Arus grid dan arus beban (bawah)	74
Gambar 4.15.	Tegangan (atas) dan daya keluaran (tengah) panel PV, dan arus grid (fasa A)(bawah) ketika tingkat radiasi matahari berubah.....	75
Gambar 4.16.	Tegangan keluaran panel PV dan tegangan referensinya (atas); Daya keluaran panel PV (bawah)	76
Gambar 4.17.	Arus grid dan arus beban (fasa A)(atas); Arus grid tiga fasa (tengah); Tegangan grid (fasa A)(bawah).....	77
Gambar 4.18.	Tegangan dan daya keluaran panel PV (atas) pada tingkat radiasi sama dengan nol; Arus grid dan arus beban (bawah)	78
Gambar 4.19.	Tegangan keluaran panel PV dan tegangan referensinya (atas); Daya panel PV (tengah); Arus grid (fasa A) (bawah) ketika tingkat radiasi matahari berubah	79
Gambar 4.20.	Variabel keluaran panel PV: Tegangan referensi DC-bus dan Tegangan keluaran PV (atas); Daya keluaran PV (bawah).....	80
Gambar 4.21.	Arus grid dan arus beban (fasa A)(atas); Arus grid tiga fasa (tengah); Tegangan grid (fasa A)(bawah).....	81
Gambar 4.22.	Tegangan referensi dan tegangan keluaran PV (atas); daya keluaran PV (tengah) pada kondisi tingkat radiasi 0.1kW/m ² ; Arus grid dan arus beban (bawah)	81
Gambar 4.23.	Tegangan referensi dan tegangan keluaran PV (atas); daya keluaran PV (tengah) pada kondisi tingkat radiasi sama dengan nol; Arus grid dan arus beban (bawah)	82
Gambar 4.24.	Tegangan referensi dan tegangan keluaran PV (atas); daya keluaran panel PV (tengah); arus grid	

(fasa A)(bawah) ketika tingkat radiasi matahari berubah.....	83
Gambar 4.25. Kurva p-v pada kondisi panel PV tertutup sebagian.....	84
Gambar 4.26. Tegangan dan daya keluaran panel PV, dan arus grid ketika panel PV tertutup sebagian	84

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Standar IEEE 519.....	22
Tabel 3.2. Parameter sistem untuk pengujian.....	42
Tabel 3.3. Parameter beban campuran.....	42
Tabel 3.4. Tingkat distorsi arus grid (THD).....	46
Tabel 4.1. Tingkat Insolation/radiasi dan Keluaran Panel PV.....	55
Tabel 4.2. Kerja/aksi Algoritma Hill Climbing.....	60

1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Elektronika daya sudah banyak digunakan dalam berbagai bidang kehidupan manusia, misalnya bidang transportasi, peralatan rumah tangga, telekomunikasi, konversi energi dan lain sebagainya. Dalam penggunaannya secara umum, elektronika daya berfungsi merubah (konversi) bentuk dan besaran listrik (tegangan, arus, frekuensi, jumlah fasa), serta sekaligus pengendali aliran daya.

Banyak rangkaian elektronika daya dimanfaatkan sebagai konverter untuk merubah besaran listrik bolak-balik (AC) ke besaran listrik searah (DC) atau sebaliknya. Sisi AC konverter biasanya terdapat beban AC atau sumber listrik AC seperti jaringan listrik atau pembangkit listrik AC. Sedangkan sisi DC konverter dipasang beban DC atau sumber listrik DC seperti baterai atau panel surya.

Rangkaian konverter untuk mengkonversi besaran listrik DC ke AC biasa disebut inverter. Berbagai macam rangkaian inverter disusun dari saklar-saklar semikonduktor. Agar saklar tersebut dapat bekerja dengan baik, maka diperlukan rangkaian kontrol yang mengendalikan kondisi saklar semikonduktor untuk terbuka (*on*) atau tertutup (*off*). Rangkaian ini mengendalikan proses konversi dari besaran listrik DC ke AC dan aliran daya antara sisi DC dan sisi AC. Berbagai pengetahuan tentang rangkaian elektronika daya sebagai perubah (konverter) sudah banyak dipublikasikan baik dari segi konfigurasi dan sistem kendali maupun aplikasinya [1][2].

Rangkaian inverter dan aplikasinya berkembang seiring dengan bertumbuhnya kebutuhan pemanfaatan inverter. Dalam buku ini dibahas hasil penelitian tentang penggunaan rangkaian inverter

sebagai filter daya aktif (*active power filter* – APF) tipe paralel. Pada saat yang bersamaan, rangkaian inverter yang sama juga dipakai sebagai pengatur aliran daya dari panel surya yang merupakan sumber energi terbarukan ke jaringan listrik.

Sebuah inverter dapat difungsikan sebagai filter daya aktif untuk meningkatkan kualitas daya dari sistem tenaga listrik. Sistem tenaga listrik sering terganggu oleh beban tak linier yang menghasilkan arus dan tegangan harmonisa. Akibatnya bentuk gelombang arus dan tegangan sistem terdistorsi. Sebagai filter daya aktif, sisi DC inverter dipasang kapasitor yang merupakan penyimpan energi. Sedangkan sisi AC inverter dihubungkan dengan jaringan listrik pada titik sambung atau *point of common coupling* (PCC). Inverter bekerja seperti sumber arus yang menginjeksi anti harmonisa ke jaringan listrik. Akibatnya arus yang mengalir pada jaringan listrik terbebas dari distorsi dan berbentuk gelombang sinus. Anti harmonisa berarti gelombang arus/tegangan harmonisa yang sama tetapi berlawanan fasa dengan yang dihasilkan beban tak linier.

Sebuah inverter dapat juga digunakan untuk mengirim daya aktif dari pembangkit energi terbarukan seperti panel surya (*photovoltaic* – PV) ke jaringan listrik dan ke beban listrik AC. Sistem ini dikenal dengan nama *grid-connected PV system*. Dalam hal ini, sisi DC rangkaian inverter dihubungkan dengan panel surya, sedangkan sisi AC dihubungkan dengan jaringan listrik pada titik sambung atau *point of common coupling* (PCC) dan beban listrik AC. Agar energi dari panel surya yang dikirim ke jaringan listrik menjadi maksimum, rangkaian inverter biasanya dilengkapi dengan mekanisme pelacakan titik daya maksimum (*maximum power point tracking* – MPPT).

Buku ini fokus pada panel surya sebagai obyek penelitian. Instalasi, penggunaan dan perawatan panel surya sebagai sumber energi terbarukan sangat mudah dan sederhana. Panel surya mengkonversi energi matahari yang tersedia tak terbatas ke energi

listrik secara langsung. Panel menerima sinar matahari dan terminal keluarannya berupa besaran listrik DC. Tidak ada bagian yang bergerak dalam proses konversi. Proses konversi terjadi melalui komponen semikonduktor (yang bila tidak ada cahaya matahari berfungsi sebagai dioda). Jumlah energi listrik yang dihasilkan tergantung dari intensitas cahaya matahari.

Dari kondisi diatas, sebuah rangkaian inverter dimungkinkan untuk dimanfaatkan sebagai pengirim daya aktif dari panel surya dan filter harmonisa sekaligus. Adanya potensi untuk mengintegrasikan kedua fungsi ini dalam satu rangkaian inverter disebabkan keduanya mempunyai konfigurasi yang mirip yaitu sisi AC rangkaian inverter dihubungkan dengan jaringan listrik dan sisi DC sebagai pengaturan daya aktif. Tetapi inverter tersebut harus dapat menangani aliran daya aktif dan aliran daya harmonisa secara bersamaan. Walaupun dari sumber yang berbeda (panel surya dan beban tak linier), kedua aliran daya ini pasti terjadi dalam jaringan listrik yang sama. Diharapkan kedua fungsi ini tidak saling mengganggu dan masing-masing fungsi mudah dikendalikan. Dengan demikian kestabilan sistem secara keseluruhan dapat terjaga. Demikian juga sistem harus tetap bekerja dengan stabil ketika salah satu fungsi hilang, misalnya tidak adanya aliran daya aktif karena tingkat pencahayaan matahari yang sangat rendah.

Penggunaan rangkaian inverter untuk pengiriman daya aktif ke jaringan listrik dan untuk filter daya aktif dapat juga dilihat dari beberapa literatur [3][4]. Tetapi pada buku ini yang merupakan hasil penelitian disajikan metoda baru yang lebih sederhana dan efektif serta mudah diimplementasikan. Pembuktian implementasi konsep dilakukan dengan simulasi komputer yang menggunakan simulator PSIM.

1.2 Signifikansi dan Kontribusi

Studi pengembangan rangkaian elektronika daya untuk pemanfaatan energi terbarukan sangat penting dan berguna sehubungan dengan krisis energi di dunia termasuk di Indonesia. Energi listrik dari energi terbarukan sangat penting bagi daerah pedesaan atau daerah terpencil karena ketersediaan energi ini tidak terbatas. Penyediaan energi listrik dari sumber energi terbarukan tidak saja dapat meningkatkan rasio elektrifikasi di Indonesia, tetapi juga menggantikan sumber energi fosil yang dapat menimbulkan polusi udara karena menghasilkan gas yang berbahaya bagi atmosfer seperti karbon dioksida. Dengan demikian penggunaan energi terbarukan yang ramah lingkungan juga dapat mencegah terjadinya pemanasan global dan perubahan iklim yang membahayakan umat manusia.

Sistem tenaga listrik sering terganggu oleh beban tak linier yang menghasilkan arus dan tegangan harmonisa. Karena itu, pengembangan rangkaian elektronika daya untuk meningkatkan kualitas daya listrik sangat penting agar kinerja dan keandalan sistem tenaga listrik dapat ditingkatkan dan rugi-rugi pada jaringan listrik dapat ditekan. Hal ini dapat meningkatkan efisiensi pada jaringan listrik.

Jadi, dengan mengembangkan rangkaian inverter (dalam hal ini untuk sistem tiga fasa) yang dimanfaatkan sebagai pengirim daya aktif dan filter daya aktif, kuantitas dan kualitas daya listrik pada jaringan listrik dapat ditingkatkan. Dengan demikian studi ini dapat membantu mengatasi krisis energi dewasa ini.

Referensi:

- [1] Rashid, M.H., *Power Electronics: Circuits, Devices and Applications*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 3rd ed., 2004
- [2] Mohan, Ned, Undeland, T.M., and Robbins, W.P., *Power Electronics: Converters, Applications and Design*, John Wiley & Sons Inc., Singapore, 3rd ed., 2003.
- [3] Grandi, G., Casadei, D., and Rossi, C., *Direct Coupling of Power Active Filters with Photovoltaic Generation System with Improved MPPT Capability*, in IEEE Power Tech Conference, 2003. Bologna, Italy.
- [4] Wu, Tsai-Fu et.al., *PV Power Injection and Active Power Filtering with Amplitude-Clamping and Amplitude-Scaling Algorithms*, IEEE Transaction on Industry Application, 2007, **43**(3): p.731-741

2 SEKILAS INVERTER TIGA FASA

Konverter DC-AC atau umumnya disebut inverter adalah suatu alat elektronika daya yang berfungsi menghasilkan besaran listrik AC dari besaran listrik DC. Masukan dari inverter adalah sumber listrik DC dan keluarannya adalah besaran listrik AC yang mana nilai amplitudo dan frekuensinya dapat diatur. Walaupun demikian, dalam proses konversi DC-AC, aliran daya dimungkinkan terjadi dalam dua arah (sisi AC ke DC dan sisi DC ke AC). Jadi, konverter dapat bekerja dalam empat kuadran bidang $v - i$.

Proses konversi dilakukan dengan mengendalikan saklar elektronika daya (Thyristor dan Transistor) agar bekerja secara *switching* terbuka (*on*) dan tertutup (*off*), dan tidak bekerja pada daerah linier (daerah aktif). Rangkaian kontrol menghasilkan sinyal pulsa bagi *gate* saklar untuk mengendalikan kondisi *on* dan *off* saklar tersebut.

Bentuk gelombang AC yang umum diinginkan adalah sinusoidal. Akan tetapi, pada kenyataannya seringkali bentuk gelombang AC yang dihasilkan mendekati sinusoidal dengan tingkat distorsi tertentu atau bahkan berbentuk kotak/persegi. Karena itu, biasanya kinerja sebuah inverter diukur dari tingkat distorsi yang dihasilkan (*total harmonic distortion* – THD). Makin kecil tingkat distorsi terhadap gelombang sinuoidal, makin baik kinerja inverter tersebut. Dengan bantuan filter, distorsi dapat dikurangi atau dihilangkan.

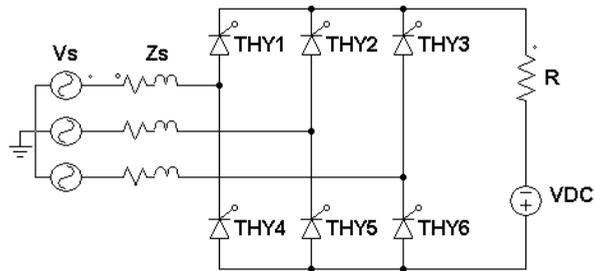
Inverter dapat bekerja sebagai sebuah unit yang berdiri sendiri atau disebut *stand-alone inverter* dan menghasilkan tegangan AC dengan amplitudo dan frekuensi yang diinginkan. Dalam hal ini sisi

AC rangkaian inverter dihubungkan langsung pada beban listrik AC. Salah satu contohnya adalah lampu penerangan jalan umum yang disuplai oleh panel surya yang dilengkapi dengan baterai. Daya listrik mengalir dari sumber listrik DC dan diserap oleh lampu.

Selain itu, sisi AC inverter dapat juga dihubungkan langsung dengan jaringan listrik atau disebut *grid-connected inverter*. Dalam hal ini daya listrik mengalir dari sumber listrik DC ke jaringan listrik (AC *grid*). Beban listrik AC menerima energi listrik secara tidak langsung karena terhubung pada jaringan listrik. Besaran listrik AC yang dihasilkan akan disesuaikan dengan besaran listrik AC dari jaringan listrik.

Salah satu contoh inverter yang terhubung langsung dengan jaringan listrik adalah penggunaan *line-commutated inverter* [1]. Rangkaian ini sebenarnya adalah rangkaian *controlled rectifier* yang menggunakan Thyristor atau SCR (*silicon controlled rectifier*) sebagai saklar elektronika daya. Untuk inverter tiga fasa, tiga pasang SCR disusun dalam konfigurasi jembatan dengan tiga kaki (gambar 2.1). Thyristor adalah saklar elektronika daya yang kondisi tertutup (*on*) terjadi bila tegangan anoda-katoda lebih besar dari nol ($v_{AK} > 0$) dan ada sinyal positif (pulsa) pada *gate*. Sedangkan kondisi terbuka (*off*) terjadi bila tidak ada arus yang melaluinya dan $v_{AK} < 0$.

Rangkaian ini tergantung pada sumber tegangan AC, karena penentuan sudut penyalan (α) *gate* SCR harus sinkron dengan frekuensi dan titik nol (*zero crossing*) gelombang sumber listrik AC tersebut. Bila sudut penyalan diatur $90^\circ < \alpha < 180^\circ$, maka tegangan rata-rata pada sisi DC akan bernilai negatif dan daya listrik pada sisi DC akan bernilai negatif juga. Bila sisi DC terdapat sumber listrik DC, maka rangkaian akan berfungsi sebagai inverter yang terhubung dengan jaringan listrik (*grid-connected inverter*). Aliran daya terjadi dari sisi DC ke sisi AC.



Gambar 2.1. Line-commutated inverter

Keterangan gambar 2.1:

- THY: Thyristor/SCR
 Vs: tegangan sumber listrik AC
 Zs: impedansi sumber listrik AC
 VDC: sumber listrik DC
 R: resistor dalam sumber listrik DC

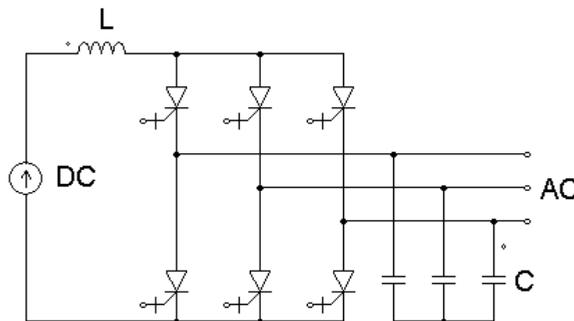
Rangkaian inverter dapat menghasilkan tegangan dan/atau arus AC satu fasa atau multi fasa. Pada tulisan ini dibahas tipe inverter tiga fasa. Berikut ini adalah beberapa klasifikasi umum rangkaian inverter tiga fasa.

2.1 Klasifikasi berdasarkan Sumber listrik DC

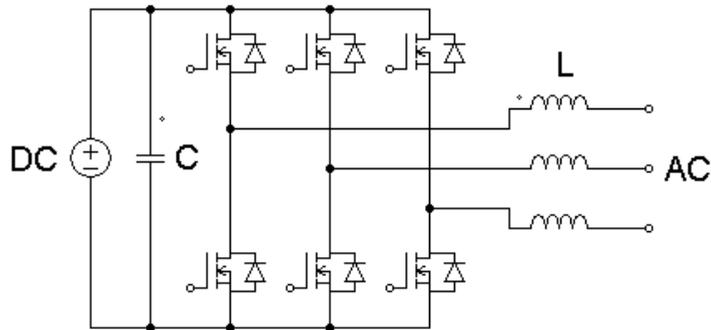
Ditinjau dari jenis sumber listrik pada sisi DC, inverter digolongkan menjadi CSI (*Current Source Inverter*) dan VSI (*Voltage Source Inverter*) [2][3]. Pada CSI, sisi DC atau DC-bus dihubungkan dengan sumber arus DC. Sebagai alternatif, pada DC-bus terdapat induktor (L) yang mana arus yang melaluinya dipertahankan tetap. Contoh saklar elektronika daya yang umum digunakan adalah *Gate Turn Off* (GTO) Thyristor atau Transistor yang dipasang seri dengan Dioda. Dengan demikian arus yang mengalir melalui setiap saklar hanya satu arah, sedangkan tegangan pada setiap saklar dimungkinkan

dua arah. Pada VSI, sisi DC atau DC-bus dihubungkan dengan sumber tegangan DC. Sebagai alternatif, pada DC-bus dapat juga dipasang kapasitor (C) yang mana tegangan kapasitor dipertahankan tetap. Saklar semikonduktor yang biasa digunakan adalah transistor seperti *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT) atau *Metal Oxide Semiconductor Field Effect* (MOSFET) yang dilengkapi dengan dioda yang dipasang paralel terbalik (anti-paralel). Dengan demikian arus yang mengalir melalui setiap saklar dimungkinkan dua arah, sedangkan tegangan pada setiap saklar hanya satu arah.

Pada umumnya, inverter yang lebih sering dipakai adalah VSI karena mudah dibuat dan dikendalikan, rugi-ruginya rendah dan harganya relatif murah. Sedangkan CSI biasanya untuk pengendali motor AC dengan daya yang sangat besar dan mempunyai kemampuan pengaman hubung singkat. Rangkaian umum CSI dan VSI (tiga fasa) dapat dilihat pada gambar 2.2 dan 2.3. Pada buku/tulisan ini dipilih inverter jenis VSI.



Gambar 2.2. CSI dengan GTO



Gambar 2.3. VSI dengan MOSFET dan Dioda anti-paralel

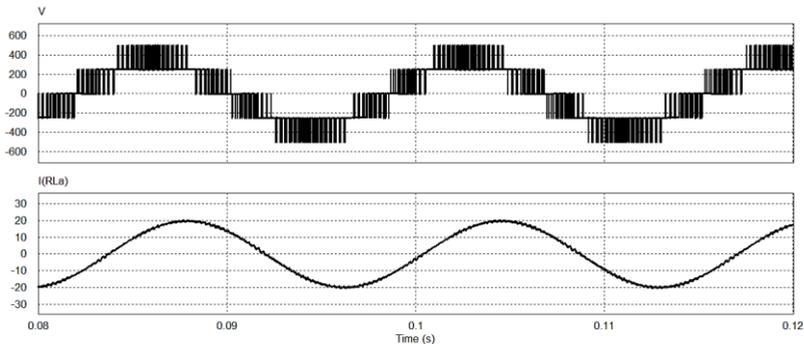
2.2 Klasifikasi berdasarkan Rangkaian VSI

Voltage Source Inverter (VSI) tiga fasa dengan transistor sebagai saklar elektronika daya digunakan untuk melayani beban listrik AC tiga fasa. Beban listrik tiga fasa boleh disuplai oleh tiga buah inverter satu fasa dengan konfigurasi jembatan (*H-bridge*). Beda fasa antar inverter satu fasa sebesar 120 derajat. Konfigurasi *H-bridge* terdiri dari empat saklar elektronika daya yang disusun dalam dua kaki. Dua saklar pada tiap kaki tidak boleh *on* atau *off* bersamaan (*shoot-through*) supaya tidak terjadi hubung singkat pada DC-bus. Transistor dilengkapi dengan dioda anti-paralel sehingga dapat melayani aliran arus dua arah.

Pada umumnya inverter menghasilkan dua-tingkatan (*two-level*) gelombang tegangan AC kotak/persegi dengan pola *pulse width modulation* (PWM) yang biasa disebut *bipolar switching* [1]. Gelombang PWM tersebut mempunyai amplitudo tegangan $+\frac{V_{dc}}{2}$ dan $-\frac{V_{dc}}{2}$. Ada juga gelombang PWM yang mempunyai tiga-tingkatan (*three-level*) gelombang tegangan AC kotak/persegi yang biasa

disebut *unipolar switching* [1]. Gelombang PWM ini mempunyai amplitudo tegangan $+\frac{V_{dc}}{2}$, 0, dan $-\frac{V_{dc}}{2}$.

Dalam perkembangannya, keluaran inverter dapat terdiri dari beberapa tingkatan (*level*) tegangan yang disusun bertingkat satu dengan yang lain sehingga menghasilkan gelombang tangga yang mendekati bentuk sinusoidal (gambar 2.4). Inverter ini disebut Multi-Level Inverter (MLI) [4]. Hal ini dapat menurunkan *insulation stress*, dv/dt dan tingkat distorsi tegangan keluaran. Kerugiannya adalah rangkaian daya dan rangkaian kendalinya menjadi rumit dengan komponen yang bertambah.

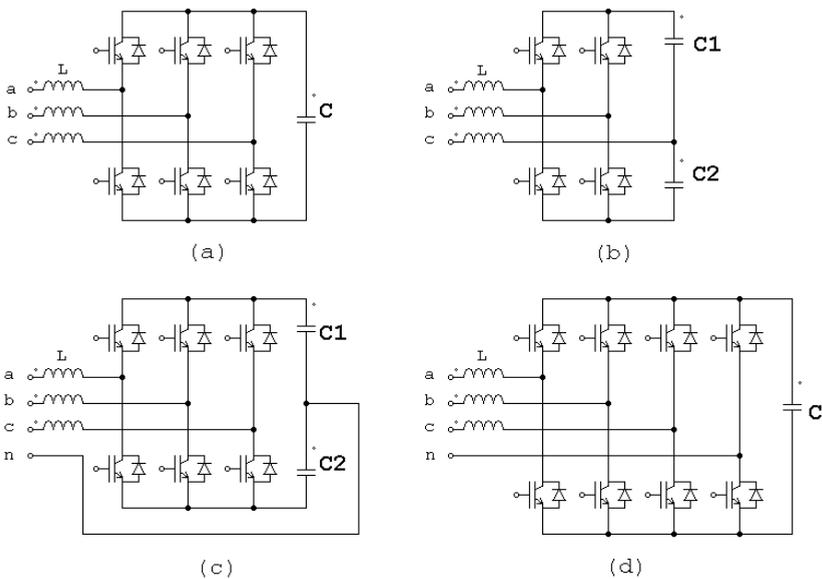


Gambar 2.4. Gelombang tegangan (atas) dan arus (bawah) dari Multi-level Inverter (MLI)

Secara sederhana dan praktis, beban listrik tiga fasa dilayani oleh inverter dua- atau tiga-tingkatan tegangan dalam satu kesatuan tiga fasa. Inverter ini dapat terdiri dari 4, 6 atau 8 saklar elektronika daya yang tersusun dalam 2, 3 atau 4 kaki. Konfigurasi ini dapat digunakan untuk sistem tiga atau empat kawat. Tiga buah kawat digunakan untuk jalur fasa, sedangkan kawat ke-empat adalah jalur netral (bila beban terhubung bintang/star yang mempunyai titik

netral). Berbagai macam konfigurasi VSI tiga fasa tersebut dapat dilihat pada gambar 2.5 [5][6][7]. Gambar 2.5a dan b adalah inverter tiga-fasa tiga-kawat (fasa a,b,c), sedangkan gambar 2.5c dan d adalah inverter tiga-fasa empat-kawat (fasa a,b,c, dan netral n). Sesuai konfigurasi VSI, sisi DC dipasang kapasitor (C) dan sisi AC terdapat filter induktor (L).

Rangkaian VSI tiga-fasa empat-kawat menjadi pilihan yang menarik karena dapat juga melayani beban satu fasa dengan jumlah saklar elektronika daya yang minimum. Dalam banyak kasus, sistem tiga fasa mempunyai beban satu fasa. DC-bus VSI terdiri dari dua kapasitor (C1 dan C2) yang titik sambungannya dihubungkan dengan titik netral sumber listrik AC melalui kawat ke-empat. Jadi rangkaian ini efektif untuk menangani beban satu fasa dan tiga fasa sekaligus.



Gambar 2.5. Berbagai Konfigurasi Rangkaian VSI 3 fasa dengan IGBT dan Dioda anti-paralel

2.3 *Klasifikasi berdasarkan Sistem Kendali*

Pengaturan aliran daya antara sisi DC dan sisi AC rangkaian VSI dapat dilakukan dengan kendali tegangan (*voltage controlled – VC*) atau kendali arus (*current controlled – CC*) [8][9][10]. VSI dengan kendali tegangan disingkat menjadi VC-VSI, sedangkan VSI dengan kendali arus disingkat menjadi CC-VSI. Mekanisme yang umum digunakan berbasiskan *pulse-width modulation* (PWM).

Keluaran VSI dengan kendali tegangan (VC-VSI) yang penting adalah tegangan. Jadi, saklar elektronika daya dikendalikan buka/tutupnya untuk mengendalikan tegangan keluaran sisi AC (bentuk, besaran, frekuensi dan fasanya) agar sesuai dengan tegangan referensi yang diinginkan. Kendali tegangan umumnya cocok untuk inverter yang bekerja mandiri seperti pada aplikasi *Solar Home System*.

Sedangkan keluaran untuk VSI dengan kendali arus (CC-VSI) yang penting adalah arus. Jadi, rangkaian kontrol mengendalikan arus keluaran yang lewat induktor (L) pada sisi AC berdasarkan arus referensi yang diinginkan. Kendali arus umumnya cocok untuk inverter yang terhubung dengan sumber listrik AC. Dalam hal ini inverter berfungsi sebagai penghubung antara sumber listrik DC misalnya panel surya, dan sumber listrik AC misalnya generator AC atau jaringan listrik.

Referensi

- [1] Mohan, Ned, Undeland, T.M., and Robbins, W.P., *Power Electronics: Converters, Applications and Design*, John Wiley & Sons Inc., Singapore, 3rd ed., 2003.
- [2] Yunus, H.I. and R.M. Bass. *Comparison of VSI and CSI topologies for single-phase active power filters*, in *Power*

- Electronics Specialists Conference, PESC '96, p. 1892-1898 vol.2, 1996.
- [3] Benchaita, L., S. Saadate, and A. Salemnia, *A comparison of voltage source and current source shunt active filter by simulation and experimentation*, IEEE Trans. on Power Systems, vol. 14, no. 2, p. 642-647, 1999.
- [4] Rodriguez, J., Jih-Sheng Lai, Fang Zeng Peng, *Multilevel inverters: a survey of topologies, controls and applications*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 49, no. 4, p.724-738, Aug 2002
- [5] El-Habrouk, M., M.K. Darwish, and P. Mehta, *Active power filters: a review*, IEE Proc. of Electric Power Applications, vol. 147, no. 5, p. 403-413, 2000.
- [6] Singh, B., K. Al-Haddad, and A. Chandra, *A review of active filters for power quality improvement*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 46, no. 5, p. 960-971, 1999.
- [7] Jiang, M.C., *Analysis and design of a novel three-phase active power filter*, IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, vol. 37, no. 3, p. 824-831, 2001.
- [8] Ashari, M., C.V. Nayar, and S. Islam. *Mitigation of line and neutral current harmonics in three-phase distribution systems*. in Industry Applications Conference, p. 3166-3171 vol.5, 2000.
- [9] Buso, S., L. Malesani, and P. Mattavelli, *Comparison of Current Control Techniques for Active Filter Applications*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 45, no. 5, p. 722-729, 1998.
- [10] Green, T.C. and J.H. Marks, *Control techniques for active power filters*, IEE Proc. of Electric Power Applications, vol. 152, no. 2, p. 369-381, 2005.

3 FILTER DAYA AKTIF

3.1 Masalah Kualitas Daya Listrik (*Harmonisa*)

Beban tak linier menghasilkan distorsi gelombang arus pada sistem tenaga listrik. Gelombang arus yang terdistorsi bersama dengan impedansi jaringan listrik menghasilkan distorsi gelombang tegangan. Akibatnya, beban listrik lain yang terhubung pada jaringan listrik tersebut akan disuplai oleh tegangan yang sudah terdistorsi. Gelombang terdistorsi dapat diuraikan menjadi gelombang-gelombang sinusoidal dengan berbagai frekuensi (biasa disebut harmonisa) yang merupakan perkalian bilangan bulat dari frekuensi fundamental sesuai dengan deret Fourier. Harmonisa ini muncul dalam kondisi *steady state*.

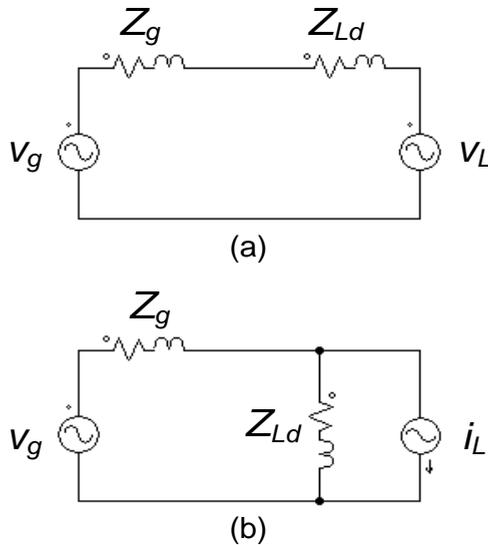
Transformer, mesin listrik dan alat magnetis lainnya dapat disebut beban tak linier ketika beroperasi pada kondisi saturasi. Contoh lain beban linier adalah *arc furnace*. Saat ini dengan berkembangnya teknologi elektronika daya, beban tak linier makin bertambah. Proses *switching* pada rangkaian elektronika daya seperti *uninterruptible power supply (UPS)*, *DC drive*, dan *AC drive* menghasilkan distorsi pada sistem tenaga listrik.

Distorsi (harmonisa) yang dihasilkan oleh beban tak linier membawa akibat buruk pada sistem tenaga listrik misalnya:

- Faktor daya dan efisiensi turun.
- Panas berlebih pada generator, transformer dan motor karena bertambahnya rugi-rugi daya.
- Tegangan sistem naik akibat resonansi paralel.
- Gagal operasi pada sistem kendali dan sistem proteksi.

- Peralatan elektronika rusak.
- Salah operasi pada peralatan ukur dan instrumentasi.
- Vibrasi pada generator dan motor.

Ada dua macam sumber harmonisa yaitu sumber tegangan dan sumber arus [1]. Sumber yang berbeda akan menimbulkan masalah yang berbeda dan ditangani dengan cara yang berbeda. Model sumber harmonisa terlihat pada gambar 3.1.



Gambar 3.1. Model rangkaian sumber harmonisa: a) sumber tegangan, b) sumber arus

Keterangan gambar 3.1

- V_g : tegangan jaringan listrik
 Z_g : impedansi jaringan listrik
 V_L : tegangan sumber harmonisa (beban)
 I_L : arus sumber harmonisa (beban)
 Z_{Ld} : impedansi sumber harmonisa (beban)

Untuk tipe sumber tegangan, impedansi jaringan listrik (Z_g) sangat mempengaruhi bentuk dan karakteristik arus yang mengalir pada jaringan listrik. Tetapi, impedansi jaringan listrik relatif tidak mempengaruhi karakteristik tegangan pada beban. Contoh tipe ini adalah rangkaian dioda penyearah dengan DC kapasitor. Pada umumnya impedansi beban (Z_{Ld}) jauh lebih kecil dari impedansi jaringan (Z_g).

Untuk tipe sumber arus, impedansi jaringan listrik (Z_g) relatif tidak mempengaruhi bentuk dan karakteristik arus yang mengalir pada jaringan listrik. Tetapi, impedansi jaringan listrik sangat mempengaruhi karakteristik tegangan pada beban. Contoh tipe ini adalah rangkaian dioda penyearah dengan DC induktor. Pada umumnya impedansi beban (Z_{Ld}) jauh lebih besar dari impedansi jaringan (Z_g).

3.2 Mengatasi Masalah Harmonisa

Ada beberapa cara mengatasi masalah harmonisa. Salah satu cara adalah menggunakan transformer daya. Beban-bekan tak linier disuplai oleh beberapa transformer daya yang berbeda vektor tegangannya. Vektor tegangan diperoleh dengan mengatur hubungan lilitannya. Harmonisa arus dari berbagai beban tak linier, setelah melewati transformer-transformer tersebut, dapat saling meniadakan akibat pergeseran fasa dari hubungan lilitan beberapa transformer tersebut [2].

Yang umum dilakukan orang untuk mengatasi harmonisa adalah memasang filter. Ada dua macam filter harmonisa yaitu filter daya pasif (*passive power filter* – PPF) dan filter daya aktif (*active power filter* – APF). Kedua macam filter ini dapat dihubungkan paralel dengan jaringan listrik untuk mengatasi sumber harmonisa dengan tipe sumber arus (disebut juga harmonisa arus), atau dihubungkan seri

pada jaringan listrik untuk mengatasi sumber harmonisa dengan tipe sumber tegangan (disebut juga harmonisa tegangan). Kombinasi kedua filter dimungkinkan untuk peningkatan efektifitas filter.

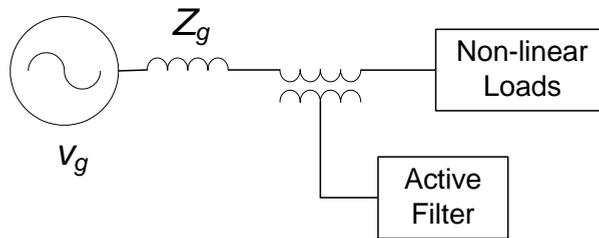
PPF menggunakan komponen pasif yaitu induktor dan kapasitor, termasuk juga *damping* resistor, untuk membentuk filter. Nilai komponen pasif tersebut diatur sedemikian hingga resonan frekuensinya sesuai dengan salah satu frekuensi harmonisa yang akan dihilangkan. PPF dapat dipasang secara paralel untuk menyerap harmonisa arus, atau dapat dipasang seri untuk menahan harmonisa tegangan. Kelemahan utama PPF adalah dapat menimbulkan resonansi seri atau paralel pada sistem, dan memiliki karakteristik kompensasi yang tetap atau tidak adaptif terhadap perubahan parameter jaringan listrik.

Untuk mengatasi kelemahan PPF, selama bertahun-tahun telah dikembangkan filter daya aktif (APF). Konsep APF dimulai pada sekitar tahun 1970 [3]. Evaluasi terhadap berbagai APF dapat dibaca pada literatur [5][6][7][8]. Pada prinsipnya APF adalah rangkaian inverter yang terhubung ke jaringan listrik (*grid-connected inverter*). Inverter ini berfungsi sebagai sumber tegangan atau sumber arus yang membangkitkan anti harmonisa. Jadi rangkaian inverter tersebut tidak menghasilkan gelombang sinusoidal melainkan menghasilkan gelombang terdistorsi sebagai anti harmonisa.

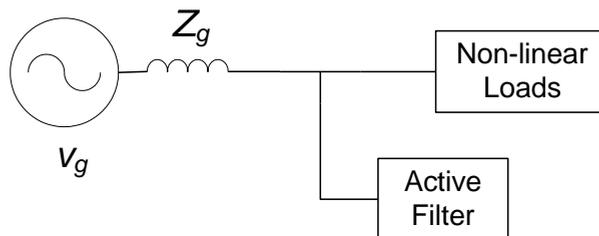
Keuntungan APF terhadap PPF adalah:

- Tidak tergantung dari impedansi jaringan listrik dan tidak sensitif terhadap perubahan parameter jaringan listrik
- Resonansi paralel dan seri dapat dihindari
- Mampu mengatasi gangguan harmonisa dalam rentang frekuensi yang lebar
- Dapat beradaptasi terhadap perubahan beban tak linier
- Bentuk dan volume filter lebih kecil dibanding PPF

Pada umumnya APF digolongkan menjadi APF tipe seri dan tipe paralel seperti terlihat pada gambar 3.2 dan 3.3. APF tipe seri dipasang secara seri antara sumber listrik dan beban dengan tujuan untuk mengkompensasi harmonisa tegangan dari sumber listrik atau dari beban. APF ini digunakan untuk mencegah harmonisa tegangan dari sumber listrik agar tidak timbul pada tegangan beban atau sebaliknya. APF tipe seri menghasilkan tegangan kompensasi yang sama tetapi berlawanan fasa dengan harmonisa tegangan.



Gambar 3.2. APF tipe seri



Gambar 3.3. APF tipe paralel

Keterangan gambar 3.2 dan 3.3

- V_g : tegangan jaringan listrik (*grid*)
 Z_g : impedansi jaringan listrik (*grid*)

APF tipe paralel dipasang secara paralel dengan sumber listrik dengan tujuan untuk mengkompensasi harmonisa arus dari beban. APF ini mencegah harmonisa arus dari beban agar tidak mengalir ke

sumber atau jaringan listrik. APF tipe paralel membangkitkan arus kompensasi yang sama tetapi berlawanan fasa dengan harmonisa arus. Kombinasi APF dan PPF dimungkinkan untuk menekan biaya. Pada buku/tulisan ini difokuskan APF tipe paralel. Pada umumnya, beban tak linier menghasilkan harmonisa arus. Dengan adanya APF tipe paralel, tingkat distorsi pada jaringan listrik karena harmonisa arus dapat ditekan.

Keberhasilan sebuah filter untuk mengatasi distorsi harmonisa biasanya diukur dari *total harmonic distortion* (THD). Standar IEEE 519 (tabel 3.1) [4] memberikan petunjuk tentang batasan gangguan harmonisa (tegangan dan arus) yang bisa ditoleransi oleh sebuah sistem tenaga listrik.

Tabel 3.1. Standar IEEE 519

I_{sc}/I_L	Harmonic current limits in % of fundamental I_L (Odd Harmonics)					THD (%)
	$h < 11$	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$35 \leq h$	
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above						
Where: I_{sc} = maximum short-circuit current at PCC I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC						
Harmonic voltage limits at PCC in % fundamental						
Maximum individual harmonics:					3%	
Maximum Total Harmonic Distortion Factor:					5%	

3.3 *Berbagai Strategi Kompensasi Harmonisa*

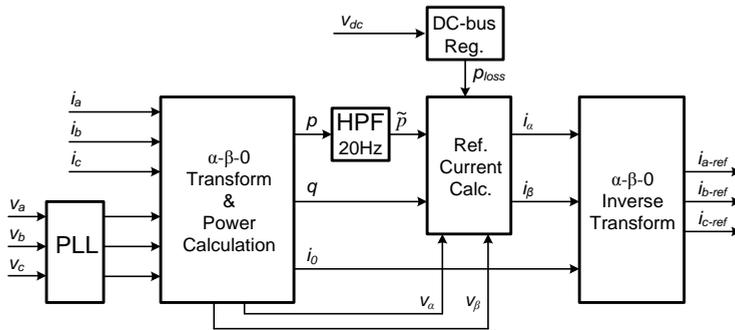
Secara konvensional, inverter sebagai APF tipe paralel membutuhkan pembentukan arus referensi anti harmonisa. Lalu, arus referensi tersebut harus diinjeksikan ke jaringan listrik oleh rangkaian inverter dengan mekanisme kendali arus. Kendali arus ini membutuhkan sebuah sensor arus untuk setiap fasa yang dipasang pada sisi AC inverter. Arus anti harmonisa yang diinjeksikan inverter harus diusahakan akurat dan sama dengan arus referensinya. Dengan demikian arus yang mengalir pada jaringan listrik akan terbebas dari harmonisa arus.

Untuk pembentukan arus referensi, sebuah sensor arus dipasang pada sisi beban untuk setiap fasa. Kemudian, sinyal keluaran sensor diproses untuk menghasilkan arus referensi yang diinginkan. Seringkali arus referensi terdiri dari tidak saja komponen harmonisa, tetapi juga komponen reaktif dan komponen arus urutan negatif dan nol untuk mengatasi ketidakseimbangan. Ada banyak strategi/metoda dalam menghasilkan arus referensi untuk kompensasi harmonisa. Metoda yang umum digunakan adalah aplikasi filter pada frekuensi fundamental dan kompensasi daya secara langsung (*instantaneous power compensation*, IPC). Metoda aplikasi filter fokus membentuk arus *grid* menjadi sinus. Sedangkan metoda IPC bertujuan agar *grid* hanya membangkitkan daya aktif yang konstan (\bar{p}).

Aplikasi *notch* filter (atau filter *band-pass* untuk perhitungan tak langsung) [3][9] dianggap sebagai metoda filter pertama kali untuk mendapatkan sinyal referensi. Arus beban (I_L) dideteksi oleh sensor arus. Sinyal arus dengan frekuensi fundamental diperoleh dengan melakukan filter 50Hz atau 60Hz terhadap arus beban. Arus referensi untuk kompensasi harmonisa diperoleh dari arus beban dikurangi arus fundamental.

Untuk metoda filter, transformasi arus beban yang terdistorsi dari *a-b-c reference frame* ke *synchronously rotating d-q reference frame* berguna dalam memfasilitasi proses filter yaitu pemisahan komponen harmonisa dari komponen fundamental [10][11]. Cara yang sama dengan itu adalah transformasi ke *stationary reference frame* yang ditunjang oleh *notch filter* [12]. Jika metoda filter berbasiskan transformasi dikombinasi dengan kendali arus linier, *cross coupling* biasanya terjadi pada loop kendali arus *d-q*. Dengan menggunakan *decoupled control* [13], masing-masing i_d dan i_q dapat dikendalikan secara terpisah atau independen. Metoda filter lain yaitu menggunakan teknik *neural network* [14][15] sebagai filter untuk memisahkan komponen harmonisa dari komponen fundamental. Metoda ini lebih sesuai untuk kondisi *steady state*.

Untuk strategi/metoda kompensasi daya secara langsung (IPC), teori yang paling terkenal dalam mendapatkan arus referensi adalah teori *p-q* yang dikenalkan oleh Akagi [16][22]. Teori ini didukung oleh transformasi Park dan/atau Clark sesuai *reference frame* yang digunakan. Diagram blok cara kerja teori ini dapat dilihat pada gambar 3.4. Karena IPC fokus pada kompensasi daya, maka perlu dihitung daya p dan q , dimana $p = \bar{p} + \tilde{p}$ dan $q = \bar{q} + \tilde{q}$. Juga dihitung p_0 bila sistem tidak seimbang. Kemudian terlihat dari gambar bahwa blok Perhitungan-Sinyal-Referensi hanya menerima sinyal dan menghitung \tilde{p} dan q . Hal ini berarti daya aktif (\bar{p}) tidak ikut dikompensasi oleh APF. Dengan demikian jaringan listrik (*grid*) diharapkan hanya menyalurkan daya aktif (\bar{p}). Arus referensi (i_{a-ref} , i_{b-ref} , i_{c-ref}) dihasilkan dengan melakukan tranformasi-balik (*inverse transform*) sinyal keluaran dari blok Perhitungan-Sinyal-Referensi (i_α dan i_β) dan i_0 (arus urutan nol dari p_0).



Gambar 3.4. Diagram blok dari metoda IPC dengan teori p-q

Teori p - q telah dikembangkan menjadi beberapa teori seperti teori *cross-vector* [17] dan teori p - q - r [18]. Pendekatan alternatif untuk implementasi IPC adalah metoda *synchronous detection* yang didasarkan pada perhitungan daya perfasa untuk mendapatkan daya rata-rata total tiga fasa [19][20], dan juga metoda transformasi komponen simetri [21].

Hasil yang diinginkan dari buku ini adalah APF tipe paralel yang mampu menjadikan arus *grid* yang sinusoidal. Tujuannya agar tidak menghasilkan distorsi gelombang tegangan pada impedansi sistem. Dengan demikian sistem tenaga listrik mampu menyediakan tegangan yang berkualitas untuk beban yang lain.

Permasalahan yang mungkin timbul dalam pembentukan gelombang arus referensi adalah hasilnya yang kurang akurat sehingga masih terdapat distorsi pada hasil kompensasi. Hal ini disebabkan karena proses filter dan perhitungan yang panjang memungkinkan terjadi penundaan waktu dan kesalahan. Selanjutnya bila ada perubahan parameter beban atau jaringan listrik, maka gelombang arus referensi membutuhkan waktu untuk bereaksi. Jadi, arus referensi yang diciptakan untuk arus keluaran inverter tidak hanya mempengaruhi kesalahan *steady-state*, tetapi juga kesalahan transien. Proses injeksi

arus keluaran inverter yang sesuai dengan arus referensi ke jaringan listrik (*grid*) dapat juga menimbulkan kesalahan.

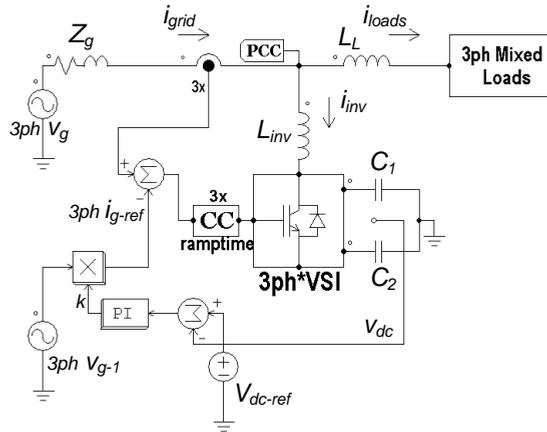
Distorsi dan ketidakakuratan dapat dikurangi jika permasalahan diatas dapat dihindari. Karena itu, dalam buku ini yang merupakan hasil penelitian dimunculkan ide untuk mengendalikan arus *grid* secara langsung. Caranya dengan mengikuti atau melacak (*tracking*) arus referensi sinusoidal tiga fasa yang seimbang. Hal ini berbeda dengan metoda terdahulu yang mengendalikan arus keluaran inverter dengan mengikuti atau melacak arus referensi harmonisa.

3.4 Konfigurasi Filter Daya Aktif (APF) Tipe Paralel dengan pengendalian arus *grid* secara langsung.

VSI yang digunakan untuk filter daya aktif (APF) tipe paralel dalam buku ini adalah VSI tiga-fasa empat-kawat dengan sembilan transistor yang membentuk jembatan seperti terlihat pada gambar 2.5c (sub-bab 2.2). Pada sisi DC terdapat dua buah kapasitor DC terhubung seri (C_1 dan C_2) yang titik sambungunya dibumikan. Pada sisi AC terdapat induktor tiga fasa (L_{inv}).

VSI tersebut dilengkapi dengan dua loop kendali yaitu loop kendali arus dan loop kendali tegangan. Loop kendali arus terdiri dari sensor arus pada *grid*, arus referensi *grid* tiga fasa (i_{g-ref}), rangkaian *polarized ramptime current control* (PRCC) dan sisi AC inverter. Loop ini membentuk arus *grid* menjadi sinus. PRCC membangkitkan sinyal *pulse width modulation* (PWM). Sinyal PWM ini mengatur proses *switching* dari saklar semikonduktor rangkaian inverter. Loop kendali tegangan terdiri dari sensor tegangan pada DC-bus, tegangan referensi DC-bus (V_{dc-ref}), rangkaian kontrol *proportional integral* (PI) sederhana dan sisi DC inverter. Loop ini menjaga agar tegangan DC-bus konstan pada nilai tegangan referensi (V_{dc-ref}) dan juga untuk menentukan amplitudo sinyal arus referensi *grid*. Dengan demikian

loop kendali tegangan menjaga keseimbangan daya aktif sistem. Gambar 3.5 menunjukkan konfigurasi APF tipe paralel dengan pengendalian arus *grid* secara langsung [23].



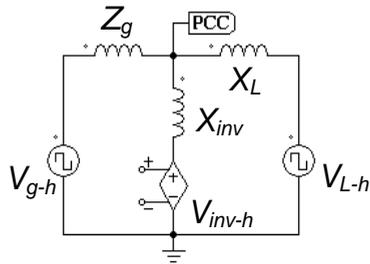
Gambar 3.5. Konfigurasi Filter Daya Aktif (APF) tipe paralel dengan pengendalian arus *grid* secara langsung

3.4.1 Induktor Seri

Dari gambar 3.5, komponen lain yang cukup penting dalam konfigurasi ini adalah induktor seri L_L yang dipasang diantara titik sambung (*point of common coupling* – PCC) dan beban [24][25]. Nilai induktansi X_L adalah sebanding dengan nilai efektif dari impedansi jaringan listrik (*grid*), Z_g . Pada dasarnya, induktor ini berfungsi sebagai pemisah tegangan antara jaringan listrik (PCC) dan beban tak linier yang menimbulkan harmonisa dengan tipe sumber tegangan (disebut harmonisa tegangan). Induktor ini sekaligus meningkatkan kemampuan pengendalian dari loop kendali arus dengan menurunkan nilai di/dt gelombang arus beban.

Tanpa induktor seri ini, PCC akan terhubung langsung dan terikat pada harmonisa tegangan dari beban tak linier. Harmonisa tegangan ini sangat berpengaruh dalam membentuk harmonisa pada tegangan PCC. Arus keluaran CC-VSI tidak dapat mengatasi harmonisa tegangan dari beban tak linier. Seperti telah disebutkan sebelumnya bahwa masalah harmonisa tegangan harus diatasi dengan filter pasif atau aktif tipe seri. Akibatnya akan selalu timbul tegangan harmonisa pada impedansi *grid*, yang mana akan selalu terjadi aliran arus harmonisa pada jaringan listrik (*grid*). Arus harmonisa ini tidak dapat dikompensasi oleh APF tipe paralel.

Untuk menghasilkan arus *grid* yang sinusoidal, CC-VSI membangkitkan arus yang sama tetapi berlawanan fasa dengan arus harmonisa dari beban. Adanya induktor seri (L_L), arus harmonisa beban tersebut menghasilkan tegangan harmonisa pada induktor ini. Sedangkan arus keluaran inverter menghasilkan tegangan harmonisa pada induktor inverter (L_{inv}). Kedua tegangan tersebut identik dan nilainya relatif sebanding dengan nilai kedua induktansi tersebut. Akibatnya, CC-VSI juga menghasilkan tegangan harmonisa (V_{inv-h}) yang ekivalen dengan tegangan harmonisa (V_{L-h}) dari beban tak linier. Jadi, tidak ada harmonisa pada tegangan PCC karena tegangan harmonisa dari beban dan dari rangkaian inverter saling meniadakan. Rangkaian ekivalen yang ditinjau dari sudut pandang harmonisa terlihat pada gambar 3.6. Jika proses filter berlangsung sempurna, yaitu ketika tidak ada arus harmonisa mengalir melalui impedansi *grid*, maka dari sudut pandang harmonisa, kombinasi antara inverter dan beban tak linier akan dilihat dari *grid* sebagai impedansi tak hingga.



Gambar 3.6. Rangkaian ekivalen untuk harmonisa

Keterangan gambar 3.6:

- V_{g-h} : tegangan harmonisa dari sumber listrik
- V_{inv-h} : tegangan harmonisa dari inverter
- V_{L-h} : tegangan harmonisa dari beban
- Z_g : impedansi sumber listrik
- X_L : induktansi seri
- X_{inv} : induktansi inverter

3.4.2 Pengendalian Langsung Arus Grid

Dari gambar 3.5 diatas, titik simpul PCC terdiri dari tiga cabang yaitu beban, jaringan listrik (*grid*) dan inverter (CC-VSI). Terlihat ada tiga arus yaitu i_L , i_g , and i_{inv} (untuk sistem tiga atau empat kawat) yang berpotensi dikendalikan secara langsung oleh CC-VSI mengikuti hukum Kirchoff tentang arus:

$$i_g = i_{inv} + i_L \quad (3.1)$$

Jadi, untuk CC-VSI yang beroperasi mengendalikan arus *grid* secara langsung, sebuah sensor arus per-fasa diletakkan pada sisi *grid*. Arus *grid* dideteksi dan langsung dikendalikan dalam loop kendali arus agar mengikuti/melacak sinyal referensi yang berbentuk sinus dan seimbang/simetri serta sefasa dengan tegangan fundamental jaringan

listrik (V_{g-1}). Dengan pelacakan (*tracking*) yang sempurna, CC-VSI secara otomatis membangkitkan arus harmonisa, arus reaktif, dan arus urutan negatif dan nol untuk kompensasi beban tak linier sesuai dengan persamaan (3.1). Hal ini terjadi tanpa pengukuran dan perhitungan komponen yang tidak diinginkan dari arus beban. Terlihat bahwa APF tipe paralel juga mempunyai kemampuan menyeimbangkan arus yang tidak simetri.

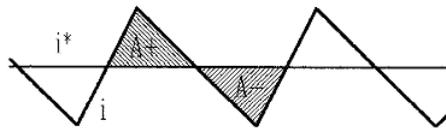
Dengan mengendalikan arus *grid* secara langsung, APF tipe paralel dapat menyediakan kompensasi secara lengkap untuk berbagai beban yang terhubung pada PCC. Jadi kompensasi tidak dilakukan untuk setiap beban secara individu. Sistem ini sederhana dan ekonomis karena hanya sebuah sensor arus per fasa dibutuhkan.

Selain itu, pengendalian arus *grid* mendorong penciptaan arus referensi untuk arus *grid* yang sinusoidal. Sedangkan cara konvensional membutuhkan penciptaan arus referensi untuk arus inverter yang penuh harmonisa dan transien. Gelombang arus referensi *grid* yang sinusoidal diperoleh dengan mudah tanpa perhitungan. Caranya adalah dengan menggunakan teknik keseimbangan daya aktif pada sistem dan dengan bantuan rangkaian *phase-lock loop* (PLL). Daya aktif dipertahankan seimbang antara jaringan listrik (*grid*), beban dan DC-bus rangkaian inverter dengan mengontrol tegangan DC-bus.

3.5 Loop Kendali Arus

Dalam loop kendali arus di gambar 3.5, sensor arus pada sisi jaringan listrik (*grid*) mendeteksi arus *grid*. Keluaran sensor tersebut dibandingkan dengan gelombang sinyal arus referensi *grid* sinusoidal. Perbandingan tersebut menghasilkan sinyal arus kesalahan, ε yaitu perbedaan antara gelombang arus sesungguhnya (arus *grid*, i_g) dan gelombang sinyal referensi, i_{g-ref} . Sinyal kesalahan diproses oleh

polarized ramp-time current control (PRCC) untuk membangkitkan sinyal PWM *bipolar*. Sinyal PWM memicu saklar elektronika daya. Saklar elektronika daya di sisi atas dan sisi bawah dari setiap kaki *half-bridge* bekerja secara komplementer. Artinya, kedua saklar bekerja bergantian dan tidak mungkin dalam kondisi tertutup (*on*) bersama. Akibatnya, arus keluaran inverter dan juga arus *grid* dapat selalu dikendalikan agar bergerak naik dan turun secara terus menerus disekitar dan mengikuti gelombang arus referensi (gambar 3.7). Pada gambar ini, i^* adalah arus referensi dan i adalah arus sesungguhnya.



Gambar 3.7. Kerja kendali arus (tracking) dengan PRCC.

Teknik PRCC yang bekerja berdasarkan ZACE (*zero average current error*) telah dikembangkan seperti pada literatur berikut [26][27][28][29]. PRCC cocok untuk APF tipe paralel karena ZACE tidak membangkitkan tambahan harmonisa orde rendah yang dapat memperburuk kinerja filter. Dari gambar 3.7, luasan $A+$ diatur agar sama dengan luasan $A-$ sehingga harga rata-rata arus sinyal kesalahan sama dengan nol.

3.5.1 Kondisi untuk Beroperasi

Bila rugi-rugi pada inverter diabaikan, berdasarkan gambar 2.5c (sub-bab 2.2) dan 3.5, arus keluaran inverter tiap fasa yang melalui induktor L_{inv} dapat dinyatakan dalam fungsi *switching* (s) sebagai berikut:

$$\frac{di_{inv}}{dt} = \frac{1}{L_{inv}}(v_{pcc} - s v_{C1} - (s-1)v_{C2}) \quad (3.2)$$

$s = 1$ jika saklar di sisi atas kaki *half-bridge* tertutup, and $s = 0$ jika saklar di sisi atas kaki *half-bridge* terbuka. Diasumsikan bahwa tegangan pada PCC (v_{pcc}), dan tegangan kapasitor DC-bus (v_{C1} dan v_{C2}) adalah konstan selama periode *switching*. Nilai v_{C1} dan v_{C2} selalu positif.

Untuk $\frac{di_{inv}}{dt} > 0$, maka

$$v_{pcc} - s v_{C1} - (s-1)v_{C2} > 0 \quad (3.3)$$

Untuk memenuhi kondisi (3.3), hubungan antara v_{C1} , v_{C2} dan v_{pcc} terkait fungsi *switching* diberikan oleh:

Jika $s = 1$, maka $v_{C1} < v_{pcc}$ (3.4)

Jika $s = 0$, maka $-v_{C2} < v_{pcc}$

Untuk $s = 1$, sistem tidak dimungkinkan bekerja selama siklus negatif dari v_{pcc} . Untuk $s = 0$, nilai apapun dari v_{C2} , persamaan (3.4) akan dipenuhi selama siklus positif dari v_{pcc} . Selama siklus negatif dari v_{pcc} , inverter berfungsi dengan baik asalkan $|v_{C2}| > |v_{pcc}|$.

Untuk $\frac{di_{inv}}{dt} < 0$, maka

$$v_{pcc} - s v_{C1} - (s-1)v_{C2} < 0 \quad (3.5)$$

Untuk memenuhi persamaan (3.5), hubungan antara v_{C1} , v_{C2} dan v_{pcc} terkait fungsi *switching* diberikan oleh:

Jika $s = 1$, maka $v_{C1} > v_{pcc}$ (3.6)

Jika $s = 0$, maka $-v_{C2} > v_{pcc}$

Untuk $s = 1$, berapapun nilai v_{C1} , persamaan (3.6) akan dipenuhi selama siklus negatif dari v_{pcc} . Selama siklus positif dari v_{pcc} ,

rangkaian inverter berfungsi dengan baik asalkan $|v_{C1}| > |v_{pcc}|$. Untuk $s = 0$, sistem tidak dimungkinkan beroperasi selama siklus positif dari v_{pcc} .

Karena itu, untuk kedua kondisi tersebut diatas, inverter selalu membangkitkan arus asalkan besarnya tegangan kapasitor DC (v_C) lebih besar dari nilai maksimum dari tegangan puncak PCC ($v_{pcc-peak}$). Jika kondisi ini tidak tercapai, maka kondisi operasi yang dibutuhkan untuk sistem tidak tersedia dan kompensasi gagal.

3.5.2 Kondisi untuk Dapat Dikendalikan

PRCC mempunyai karakteristik yang mirip dengan *sliding mode control* [26][30]. Untuk kendali arus *grid* secara langsung, sinyal arus kesalahan ε , yaitu parameter yang dikendalikan, dapat didefinisikan sebagai permukaan luncur (*sliding*).

$$\varepsilon = i_g - i_{g-ref} \quad (3.7)$$

Untuk menjamin bahwa sistem dapat tetap pada permukaan *sliding* dan mempertahankan pelacakan sempurna, kondisi berikut harus dipenuhi:

$$\varepsilon \dot{\varepsilon} \leq 0 \quad (3.8)$$

dimana $\dot{\varepsilon}$ diturunkan dari persamaan (3.7), diperoleh:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{di_g}{dt} - \frac{di_{g-ref}}{dt} \quad (3.9)$$

Dari implementasi operasi *switching*, $\dot{\varepsilon}$ dapat dikendalikan sedemikian hingga nilai positif dari sinyal kesalahan menghasilkan turunan/derivatif negatif sinyal kesalahan ($\dot{\varepsilon} < 0$). Dan nilai negatif dari sinyal kesalahan menghasilkan turunan/derivatif positif sinyal kesalahan ($\dot{\varepsilon} > 0$). Mengendalikan tanda positif/negatif dari $\dot{\varepsilon}$ berkaitan

dengan mengendalikan tanda dari di_g/dt dan juga di_{inv}/dt untuk menjadi positif atau negatif.

Menggabungkan persamaan (3.1) dan (3.9), $d\varepsilon/dt$ dapat dinyatakan sebagai:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{di_L}{dt} + \frac{di_{inv}}{dt} - \frac{di_{g-ref}}{dt} \quad (3.10)$$

Karena tanda di_{inv}/dt dan tanda di_g/dt sama/sesuai, pelacakan (*tracking*) sempurna dapat dicapai ketika:

$$\left| \frac{di_{inv}}{dt} \right| > \left| \frac{di_L}{dt} + \frac{di_{g-ref}}{dt} \right| \quad (3.11)$$

Bila persamaan (3.11) tidak terpenuhi, maka sistem akan lepas dari permukaan *sliding*, dan CC-VSI kehilangan kemampuan kendalinya. Hal ini berarti sinyal arus kesalahan tidak akan kembali ke permukaan *sliding* pada akhir setengah perioda *switching*. Merujuk ke persamaan (3.2), nilai dari di_{inv}/dt biasanya ditentukan oleh L_{inv} dan tegangan kapasitor DC.

3.6 Loop Kendali Tegangan

Agar memenuhi syarat kondisi untuk beroperasi dari loop kendali arus, tegangan kapasitor DC harus dipaksa lebih besar dari $v_{pcc-peak}$. Tegangan kapasitor juga harus dipertahankan konstan. Loop kendali tegangan menggunakan rangkaian kontrol *Proportional Integral* (PI) untuk mempertahankan nilai tegangan DC-bus yang diinginkan dengan mengatur keseimbangan daya aktif dari sistem.

3.6.1 Sistem Pengendalian Tegangan DC-bus

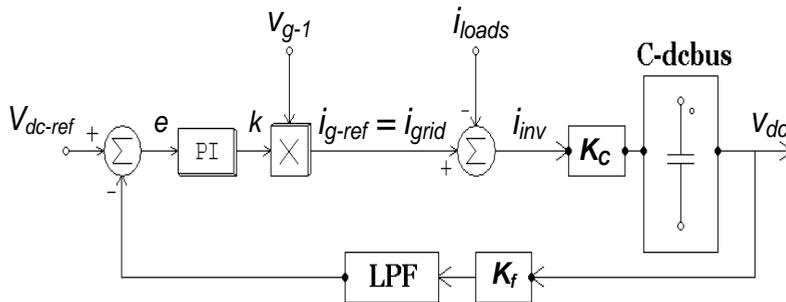
Dari gambar 3.5, loop kendali tegangan dapat disusun menjadi diagram blok seperti pada gambar 3.8. Tegangan DC-bus dideteksi

dan besarnya disesuaikan ke tingkat besaran sinyal dengan pengali K_f . Karena ada riak pada tegangan DC-bus, *first-order low-pass filter* (LPF) ditambahkan di jalur umpan balik. Sinyal tegangan DC-bus dibandingkan dengan sinyal tegangan referensi (V_{dc-ref}) dan diperoleh sinyal kesalahan (e). Sinyal kesalahan diproses oleh rangkaian kontrol PI. Keluarannya adalah pengali (*gain*) k . Gain k dikalikan dengan v_{grid-1} dan menghasilkan gelombang arus referensi *grid*, yaitu:

$$i_{g-ref} = k v_{grid-1} \quad (3.12)$$

Dimana v_{grid-1} (atau disebut juga v_{g-1}) adalah komponen fundamental dari tegangan *grid* yang diperoleh dari rangkaian PLL. Nilai k adalah keluaran rangkaian kontrol PI.

Mempertimbangkan *tracking* sempurna dari loop kendali arus, maka arus *grid* sama dengan arus referensinya. Dengan strategi mengendalikan arus *grid* secara langsung, CC-VSI secara otomatis membangkitkan arus harmonisa, reaktif, urutan negatif dan nol yang dihasilkan beban tak linier sesuai dengan persamaan (3.1). Arus inverter juga mengandung arus aktif untuk mengatasi rugi-rugi pada inverter. K_C adalah faktor konversi daya antara sisi AC dan sisi DC dari inverter.



Gambar 3.8. Loop kendali tegangan

3.6.2 Penentuan Arus Referensi

APF tipe paralel harus mengkompensasi arus harmonisa, arus reaktif dan arus tak simetri dari beban. Jika kompensasi berhasil, maka arus *grid* akan sinusoidal, seimbang dan sefasa dengan tegangan *grid* seperti persamaan berikut:

$$\begin{aligned} i_{g-a} &= \sqrt{2} I_{g-1} \sin(\omega t) \\ i_{g-b} &= \sqrt{2} I_{g-1} \sin(\omega t - 120^\circ) \\ i_{g-c} &= \sqrt{2} I_{g-1} \sin(\omega t + 120^\circ) \end{aligned} \quad (3.13)$$

Untuk mendapatkan sinyal arus referensi *grid* tiga fasa, tegangan jaringan listrik (*grid*) tiga fasa dideteksi. Setelah itu, gelombang sinus tiga fasa yang seimbang dan sefasa dengan tegangan *grid* dibangkitkan dengan bantuan rangkaian *phase-lock loop* (PLL). Hanya amplitudo komponen fundamental (I_{g-1}) gelombang sinus tiga fasa belum ditentukan.

Amplitudo gelombang arus referensi *grid* diperoleh dari prinsip keseimbangan daya aktif melalui pengendalian tegangan DC-bus dari CC-VSI. DC-bus terdiri dari kapasitor DC sebagai elemen penyimpanan energi. Aliran daya aktif dapat dinyatakan sebagai:

$$3V_{g-1} i_{g-1} = \bar{p}_L - \bar{p}_{inv} \quad (3.14)$$

Dimana \bar{p}_L adalah daya aktif yang dikonsumsi oleh beban, yang dapat dinyatakan sebagai $\bar{P}_L + \Delta\bar{P}_L$; dan \bar{p}_{inv} adalah daya aktif yang disuplai atau dikonsumsi inverter yang dapat dinyatakan sebagai $\bar{P}_{inv} + \Delta\bar{P}_{inv}$. Jadi, persamaan (3.14) dapat ditulis sebagai berikut:

$$3V_{g-1} (I_{g-1} + \Delta I_{g-1}) = (\bar{P}_L + \Delta\bar{P}_L) - (\bar{P}_{inv} + \Delta\bar{P}_{inv}) \quad (3.15)$$

Bila rugi-rugi pada CC-VSI diabaikan, dalam *steady-state*, daya aktif yang dikonsumsi oleh beban sama dengan daya aktif yang

disuplai oleh jaringan listrik. \bar{p}_{inv} sama dengan nol, sehingga $3V_{g-1} I_{g-1} = \bar{P}_L$. Bila tidak ada aliran daya aktif pada inverter, tegangan rata-rata DC-bus dapat dipertahankan tetap pada nilai tegangan referensi.

Jika beban berubah ($\Delta\bar{P}_L$), maka keseimbangan daya aktif antara beban dan jaringan listrik tidak dapat dipertahankan. Perbedaan daya aktif antara beban dan jaringan listrik akan mengalir pada CC-VSI dan dinyatakan dalam $\Delta\bar{P}_{inv}$. Hal ini disebabkan rangkaian kontrol PI pada loop kendali tegangan tidak dapat menanggapi perubahan daya secara langsung untuk menyesuaikan amplitudo arus referensi *grid*.

Perbedaan daya aktif tersebut mengalir pada kapasitor DC-bus sebagai elemen penyimpan energi sebesar $v_{C1} i_{C1} + v_{C2} i_{C2}$. Bila $v_{C1} = v_{C2} = \frac{1}{2} v_{dc}$ dan $C_1 = C_2 = C$, daya aktif yang mengalir pada kapasitor DC-bus tersebut adalah:

$$\Delta\bar{P}_{inv} = 2C \frac{v_{dc}}{2} \frac{d v_{dc}}{dt} = \frac{1}{2} C v_{dc} \frac{d v_{dc}}{dt} \quad (3.16)$$

Perubahan daya aktif diatas juga mengakibatkan tegangan rata-rata kapasitor DC bergerak menjauh dari nilai tegangan referensi $v_{dc} = V_{dc} + \Delta V_{dc}$. Catatan bahwa $x \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dx^2}{dt}$, maka persamaan (3.16) dapat disusun ulang menjadi:

$$\Delta\bar{P}_{inv} = \frac{1}{4} C \frac{d(V_{dc} + \Delta V_{dc})^2}{dt} \quad (3.17)$$

Dan karena ΔV_{dc} sangat kecil dibandingkan dengan V_{dc} , maka $\Delta\bar{P}_{inv}$ dapat disederhanakan menjadi:

$$\Delta\bar{P}_{inv} = \frac{1}{2} C V_{dc} \frac{d \Delta V_{dc}}{dt} \quad (3.18)$$

Setelah menerapkan transformasi Laplace, hubungan antara $\Delta V_{dc}(s)$ dan $\Delta \bar{P}_{inv}(s)$ dapat dinyatakan sebagai:

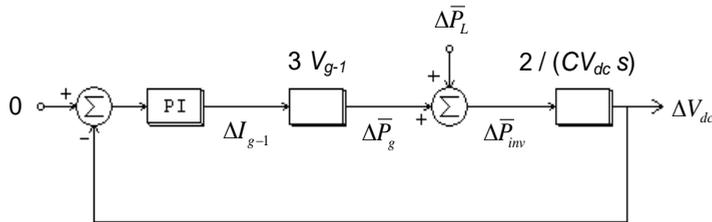
$$\frac{\Delta V_{dc}(s)}{\Delta \bar{P}_{inv}(s)} = \frac{1}{\frac{1}{2} C V_{dc} s} \quad (3.19)$$

Agar daya aktif sistem kembali seimbang, amplitudo arus *grid* harus disesuaikan dengan cepat dan tepat untuk mengkompensasi daya aktif yang diambil atau disuplai dari kapasitor DC. Penyesuaian amplitudo arus *grid* terlaksana pada saat loop kendali tegangan yang didukung oleh rangkaian kontrol PI bereaksi dengan kondisi berikut:

$$3V_{g-1} \Delta I_{g-1} = \Delta \bar{P}_L - \Delta \bar{P}_{inv} \quad (3.20)$$

$\Delta \bar{P}_{inv}$ akan bernilai nol bila ΔI_{g-1} mencapai nilai akhirnya sehingga $3V_{g-1} \Delta I_{g-1} = \Delta \bar{P}_L$. Hal ini berarti perubahan daya beban telah disuplai sepenuhnya oleh jaringan listrik. Aliran daya aktif pada jaringan listrik sama dengan aliran daya aktif pada beban. Kondisi keseimbangan daya aktif yang baru telah tercapai dengan amplitudo arus *grid* yang baru. Akhirnya, tegangan rata-rata DC-bus akan kembali berada pada nilai tegangan referensinya. Diagram blok dari kendali keseimbangan daya aktif ditunjukkan oleh gambar 3.9.

Kesimpulannya, amplitudo arus *grid* dapat dihasilkan oleh loop kendali tegangan melalui rangkaian kontrol PI. Rangkaian kontrol PI juga menjaga tegangan rata-rata kapasitor DC konstan. Jika amplitudo arus *grid* terlalu besar (atau terlalu kecil), tegangan rata-rata kapasitor DC harus bertambah (atau berkurang) untuk menyerap (atau mengirim) kelebihan (atau kekurangan) daya aktif yang disuplai oleh *grid*. Keluaran rangkaian kontrol PI (*gain k*) menentukan besarnya amplitudo arus *grid* yang bersesuaian dengan perubahan tegangan DC-bus (ΔV_{dc}).



Gambar 3.9. Kendali keseimbangan daya aktif

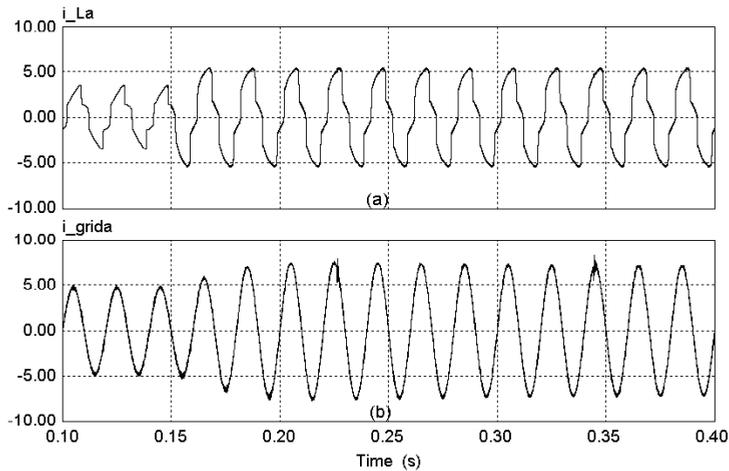
Simulasi komputer dapat menunjukkan konsep keseimbangan daya aktif dalam menentukan amplitudo sinyal referensi arus *grid*. Hasilnya menggambarkan hubungan antara perubahan daya beban, perubahan tegangan DC-bus, dan reaksi atau tanggapan loop kendali tegangan melalui rangkaian kontrol PI. Simulasi dilakukan dengan kasus daya beban bertambah. Proses yang sama terjadi bila daya beban berkurang.

Dari gambar 3.10 dan 3.11 terlihat bahwa ketika daya beban berubah, (dalam hal ini terjadi pada $t = 0.15$ detik), daya aktif dari sistem menjadi tidak seimbang. Amplitudo arus beban naik (fasa A diperlihatkan untuk memudahkan penjelasan). Kapasitor DC-bus segera mensuplai perbedaan daya aktif. Akibatnya, tegangan DC-bus turun karena kapasitor DC melepaskan muatannya.

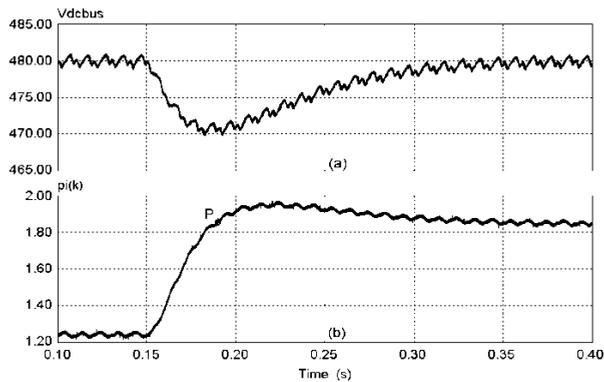
Beberapa saat kemudian, rangkaian kontrol PI mulai bereaksi karena adanya sinyal kesalahan tegangan DC-bus, yaitu selisih antara tegangan DC-bus referensi dan tegangan DC-bus sesungguhnya. Tegangan keluaran rangkaian kontrol PI (*gain k*) akan bertambah secara perlahan untuk mencapai besarnya amplitudo yang dibutuhkan oleh arus *grid*. Jaringan listrik (*grid*) mensuplai daya aktif ke sistem secara perlahan.

Tegangan DC-bus berhenti menurun dan mencapai titik minimum ketika *gain k* mencapai sebuah nilai disekitar titik

keseimbangan baru (titik P) (gambar 3.11). Pada daerah P ini, daya aktif dari *grid* sama dengan daya aktif yang dikonsumsi oleh beban. Daya aktif dari inverter sama dengan nol.



Gambar 3.10. Perubahan beban; (a) arus beban fasa-A (b) arus grid fasa-A



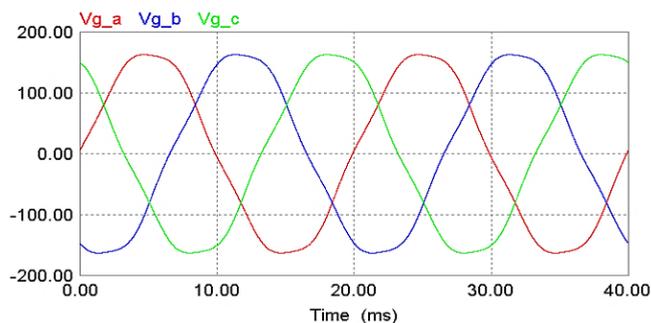
Gambar 3.11. Proses keseimbangan daya aktif; (a) tegangan DC-bus (b) keluaran rangkaian kontrol PI

Setelah itu, tegangan DC-bus bergerak kembali ke nilai tegangan referensinya. Kapasitor DC-bus mengalami pengisian

muatan dari arus *grid*. Dalam kasus ini terlihat dari keluaran rangkaian kontrol PI yang naik sedikit dan dari amplitudo arus *grid* yang sedikit lebih tinggi dari nilai *steady-state*. Ketika tegangan DC-bus sama dengan nilai tegangan referensinya, keseimbangan daya aktif yang baru telah dicapai dengan amplitudo arus *grid* yang baru. Selisih antara nilai akhir dan nilai awal dari keluaran rangkaian kontrol PI sama dengan perubahan amplitudo arus *grid*.

3.7 Hasil Simulasi dan Evaluasi Sistem

Sistem pada gambar 3.5 diatas diuji dengan menggunakan simulasi komputer (PSIM) untuk membuktikan kerja konfigurasi APF tipe paralel dengan pengendalian arus *grid* secara langsung. Tabel 3.2 menyebutkan parameter sistem untuk pengujian. Tegangan *grid* tidak sinusoidal murni dan mengandung harmonisa (THD = 3.9%). Gelombang tegangan *grid* tiga fasa terlihat pada gambar 3.12. Beban campuran terdiri dari satu fasa dan tiga fasa, baik linier maupun tak linier (tabel 3.3). Beban linier adalah beban resistif dan induktif. Beban tak linier adalah rangkaian penyearah. Beban tersebut dianggap mewakili beban yang ada di sistem tenaga listrik pada umumnya seperti di bangunan komersial.



Gambar 3.12. Tegangan grid tiga fasa

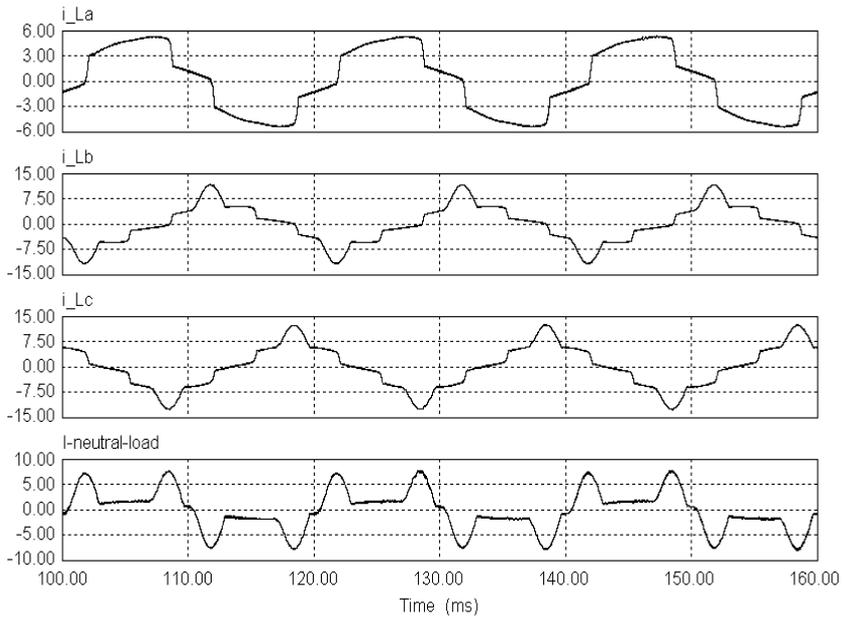
Tabel 3.2. Parameter sistem untuk pengujian

Symbol	Keterangan	Nilai
v_g	Tegangan AC <i>grid</i> , line-line, <i>rms</i>	207 V
f	Frekuensi AC <i>grid</i>	50 Hz
$Z_g \approx L_g$	Induktor <i>grid</i>	0.88mH
L_L	Induktor seri	0.92 mH
V_{dc}	Tegangan DC-bus inverter	480 V
$C_1 = C_2$	Kapasitor DC, tipe elektrolit	4000 μ F
L_{inv}	Induktor inverter	1.52 mH
C_{ac}	Kapasitor AC filter <i>switching</i>	2 μ F
f_{sw}	Target frekuensi <i>switching</i>	15.6 kHz

Tabel 3.3. Parameter beban campuran

Penyearah satu fasa dengan R-C load terhubung pada fasa B and C	Penyearah tiga fasa dengan beban R-L	Beban Linear
$C_{dc (ph B)} = 660\mu\text{F}$ $R_{L (ph B)} = 137\Omega$ $C_{dc (ph C)} = 660\mu\text{F}$ $R_{L (ph C)} = 149\Omega$	$L_{dc} = 0.25\text{H}$ $R_L = 97\Omega$	$R_{1 (ph A)} = 60\Omega$ $L_{1 (ph A)} = 0.145\text{H}$ $R_{2 (ph B)} = 60\Omega$ $L_{2 (ph B)} = 0.145\text{H}$ $R_{3 (ph C)} = 53\Omega$

Gelombang arus beban tiga fasa dengan dan arus netralnya terlihat pada gambar 3.13. Dari gambar terlihat dengan jelas bahwa arus tidak sinusoidal. Arus fasa beban juga tidak seimbang dan mengandung komponen reaktif. Arus netral yang cukup besar mengalir pada kawat netral. Bila tidak ada APF, arus beban ini akan mengalir ke jaringan listrik (*grid*), menaikkan THD arus *grid* dan mengganggu tegangan *grid*. Bila ada beban listrik lain yang terhubung pada jaringan listrik ini, maka beban tersebut akan mendapatkan tegangan yang terdistorsi.

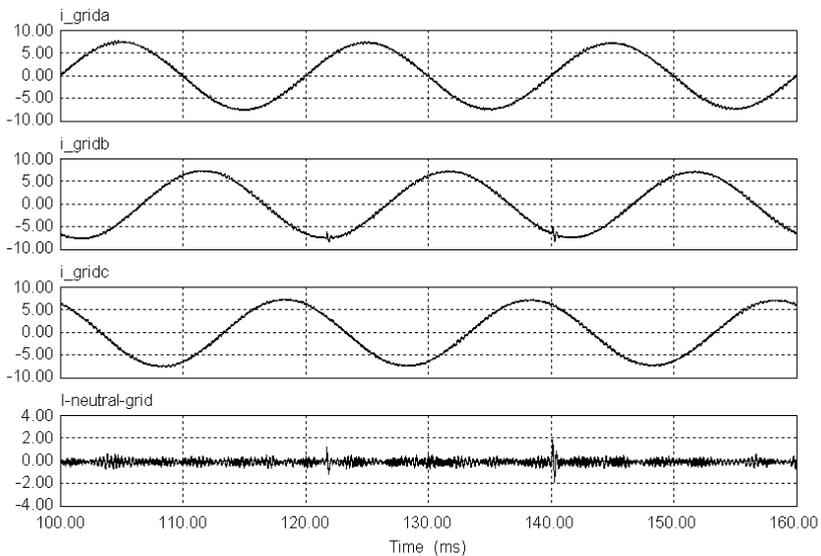


Gambar 3.13. Arus beban (fasa a, b, c) dan arus netral

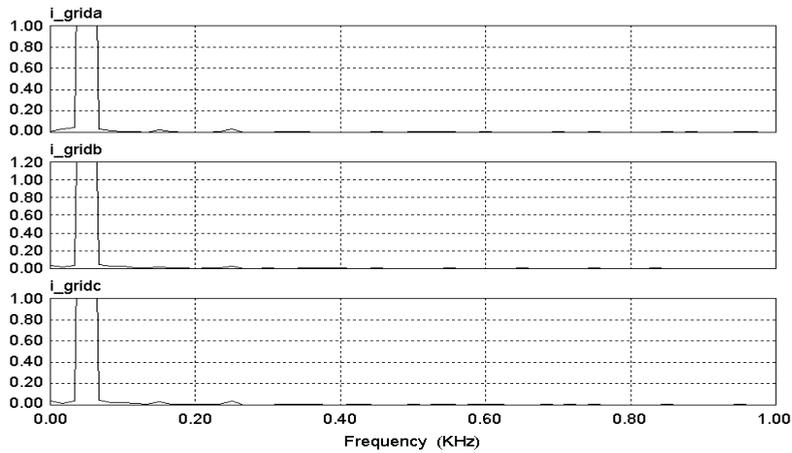
Gambar 3.14 dan 3.15 menunjukkan kinerja APF pada *steady-state*. Arus *grid* menjadi sinus dengan tingkat harmonisa yang sangat rendah. Walaupun tegangan *grid* berisi harmonisa, tetapi tidak mempengaruhi tingkat distorsi arus *grid*. THD arus *grid* sangat rendah (tabel 3.4). Besarnya arus netral mendekati nol.

APF tipe paralel ini ternyata berhasil mengkompensasi distorsi dari beban campuran. Hal ini sesuai dengan tujuan pemasangan APF tipe paralel agar tidak menambah distorsi tegangan pada sistem. Dari gambar 3.16, terlihat jelas bahwa CC-VSI mampu membangkitkan tiga arus kompensasi yang berbeda untuk setiap fasa dan arus netral secara otomatis sesuai dengan persamaan (3.1).

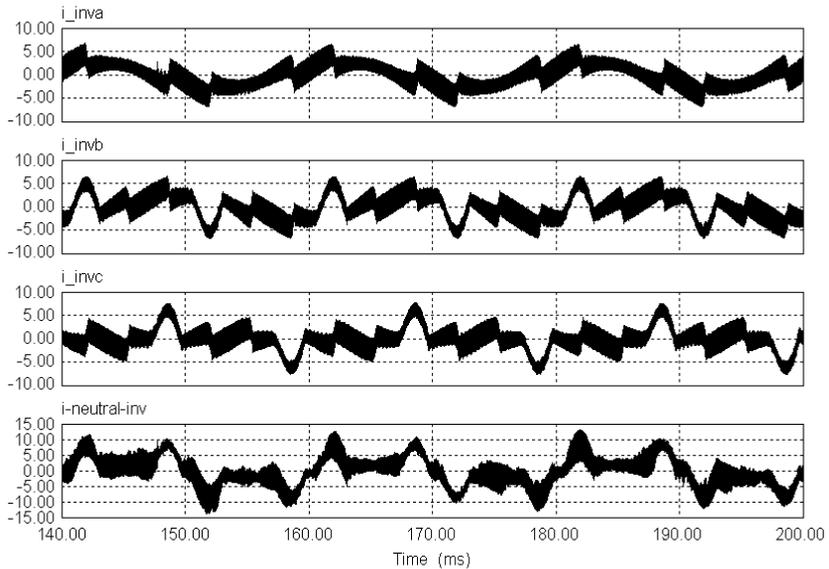
Loop kendali arus dapat bekerja dengan baik. Hal ini didukung oleh induktor seri yang mampu memisahkan PCC dari harmonisa tegangan beban tak linier. Dengan demikian PRCC dapat memaksa arus *grid* agar mengikuti gelombang arus referensi sinusoidal secara langsung dengan akurat tanpa tambahan harmonisa orde rendah karena konsep ZACE. Sedangkan riak frekuensi tinggi akibat *switching* dari CC-VSI dapat dihilangkan dengan kapasitor filter AC (C_{ac}) yang dipasang pada sisi *grid*. Arus *grid* juga sefasa dengan tegangan *grid* (gambar 3.17 – hanya fasa A dari tegangan dan arus *grid* yang ditampilkan). Amplitudo arus *grid* ditentukan oleh loop kendali tegangan yang mengendalikan keseimbangan daya aktif dari sistem.



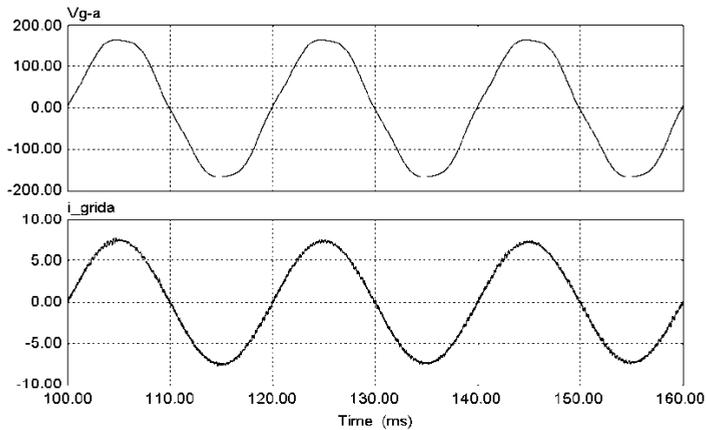
Gambar 3.14. Arus grid (fasa a, b, c) dan arus netral



Gambar 3.15. Spektrum harmonisa dari arus grid (fasa a, b, c)



Gambar 3.16. Arus keluaran (fasa a, b, c dan netral) CC-VSI



Gambar 3.17. Tegangan dan arus grid (fasa A)

Tabel 3.4. Tingkat distorsi arus grid (THD)

THD- I_{phA} (%)	1.9
THD- I_{phB} (%)	1.9
THD- I_{phC} (%)	1.7

Setelah kompensasi, arus *grid* juga seimbang dalam amplitudo dan sudut fasa. Akibatnya, arus netral pada *grid* menjadi nol. Arus *grid* seimbang karena CC-VSI dapat mendorong arus *grid* mengikuti sinyal referensi sinusoidal tiga fasa yang seimbang. Akibatnya, inverter menghasilkan lawan dari arus urutan negatif dan nol secara otomatis, tanpa melakukan pengukuran dan perhitungan komponen urutan negatif dan nol. Jadi, inverter tidak hanya mengkompensasi harmonisa dan daya reaktif dari beban tetapi juga mampu menyeimbangkan arus *grid*.

Referensi

- [1] Peng, F.Z., *Application issues of active power filters*. Industry Applications Magazine, IEEE, 1998. **4**(5): p. 21-30.
- [2] Tumbelaka, H.H., R. Stephani, D. Rohi, *Mereduksi harmonisa arus pada sistem kelistrikan dengan transformer multi-winding*, Seminar Nasional Waluyo Jatmiko, UPN Veteran Jatim, p. 21.1 – 21.7, 2012
- [3] L. Gyugyi, and E. C. Strycula, “Active AC Power Filter,” in *IEEE IAS Annual Meeting*, pp. 529-535, 1976
- [4] IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems, in IEEE Std 519-1992. 1993.
- [5] El-Habrouk, M., M.K. Darwish, and P. Mehta, *Active power filters: a review*, IEE Proc. of Electric Power Applications, vol. 147, no. 5, p. 403-413, 2000.
- [6] Singh, B., K. Al-Haddad, and A. Chandra, *A review of active filters for power quality improvement*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 46, no. 5, p. 960-971, 1999.
- [7] Green, T.C. and J.H. Marks, *Control techniques for active power filters*, IEE Proc. of Electric Power Applications, vol. 152, no. 2, p. 369-381, 2005.
- [8] Akagi, H., *New Trends in Active Filters for Power Conditioning*, IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 32, no. 6, p. 1312-1322, 1996.
- [9] C. A. Quinn, and N. Mohan, *Active Filtering of Harmonic Currents in Three-phase four-wire Systems with Three-phase and Single-phase Nonlinear Loads*, in 7th Applied Power Electronics Conference and Exposition, p. 829-836, 1992.

- [10] Bhattacharya, S. and D. Divan, *Synchronous Frame Based Controller Implementation for a Hybrid Series Active Filter System*, in IEEE IAS Annual Meeting, p. 2531-2540, 1995.
- [11] Soares, V., P. Verdelho, and G.D. Marques, *An instantaneous active and reactive current component method for active filters*, IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 15, no. 4, p. 660-669, 2000.
- [12] Newman, M.J., D.N. Zmood, and D.G. Holmes, *Stationary frame harmonic reference generation for active filter systems*, IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 38, no. 6, p. 1591-1599, 2002.
- [13] H. P. To, M. F. Rahman, and C. Grantham, *Decoupled Control of Three-phase Current Source Active Power Filter*, in Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Melbourne, Australia: ACPE, 2002
- [14] F. Temurtas, et al., *Harmonic Detection Using Feed Forward and Recurrent Neural Networks for Active Filters*, Electric Power Systems Research, vol. 72, no. 1, p. 33-40, 2004
- [15] Tumbelaka, H.H., Thiang, Sorati. *Aplikasi Jaringan Saraf Tiruan pada Shunt Active Power Filter Tiga Fasa*. Proc. of the 11th Industrial Electronics Seminar 2009. ITS, Surabaya, Oktober 2009
- [16] H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae, *Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components*, IEEE Trans. on Industry Applications, vol. **20**, no. 3, p. 625-630, 1984
- [17] F. Z. Peng, G. W. Ott, and D. J. Adams, *Harmonic and Reactive Power Compensation based on the Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-phase Four-wire Systems*,

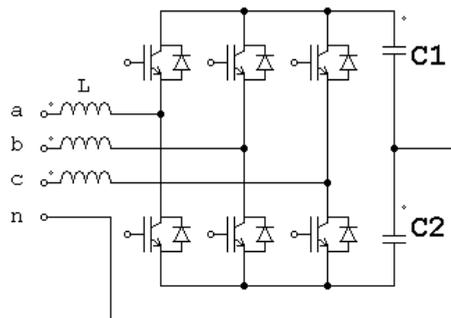
- IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 13, no. 6, p. 1174-1181, 1998
- [18] H. Kim, et al., *Instantaneous power compensation in three-phase systems by using p-q-r theory*, IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 17, no. 5, p. 701-710, 2002
- [19] C. L. Chen, and C. E. Lin, *An active filter for an unbalanced three-phase system using the synchronous detection method*, Electric Power Systems Research, vol. 36, no. 3, p. 157-161, 1996
- [20] M. S. Kandil, S. A. Farghal, and A. Elmitwally, *Multipurpose shunt active power conditioner*, IEE Proc. Generation, Transmission and Distribution, vol. 149, no. 6, p. 719-725, 2002
- [21] A. Ghosh, and A. Joshi, *A new approach to load balancing and power factor correction in power distribution system*, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 15, no. 1, p. 417-422, 2000
- [22] E. H. Watanabe, R.M. Stephan, and M. Aredes, *New concepts of instantaneous active and reactive powers in electrical systems with generic loads*, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 8, no. 2, p. 697-703, 1993
- [23] Tumbelaka, H.H., et al. *A Grid Current-Controlling Shunt Active Power Filter*, Journal of Power Electronics, vol. 9, no. 3, 2009
- [24] F. Z. Peng, *Application Issues of Active Power Filter*, IEEE Industry Applications Magazine, vol. 4, no. 5, p. 21-30, 1998
- [25] Tumbelaka, H.H., L. J. Borle, and C. V. Nayar, *Analysis of a Series Inductance Implementation on a Three-phase Shunt Active Power Filter for Various Types of Non-linear Loads*, Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering, Engineers Australia, vol. 2, no. 3, p. 223-232, 2005

- [26] L. J. Borle, *Zero average current error control methods for bidirectional AC-DC converters*, PhD Thesis, Department of Electrical Engineering, Curtin University of Technology, Western Australia, 1999
- [27] L. J. Borle, and C. V. Nayar, *Zero Average Current Error Controlled Power Flow for AC-DC Power Converter*, IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 10, no. 1, p. 725-732. 1995.
- [28] L.J. Borle, *Four Quadrant Power Flow in A Ramptime Current Controlled Converter*, APEC, p. 898-904. 1996.
- [29] L.J. Borle, *A Three-phase Grid-connected Inverter with Improved Ramptime Current Control in Programmable logic*, PEDES, p. 452-457, 1998.
- [30] J. Y. Hung, W. Gao, and J. C. Hung, *Variable Structure Control: A Survey*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 40, no. 1, p. 2-22, 1993.

4 TRANSFER ENERGI SURYA

4.1 Voltage Source Inverter (VSI) Tiga Fasa

Untuk transfer energi matahari, inverter yang digunakan sama dengan untuk filter daya aktif (APF) yaitu VSI tiga-fasa empat-kawat (fasa a,b,c, dan netral n). Pada sisi DC terdapat kapasitor terhubung seri (C_1 dan C_2) yang titik sambungannya dibumikan, dan pada sisi AC terdapat induktor tiga fasa (L) dan terhubung ke grid (*grid-connected inverter*). VSI membentuk jembatan dengan tiga kaki. Setiap kaki mempunyai dua buah saklar semikonduktor seperti *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT) yang dilengkapi dengan dioda anti paralel. Rangkaian VSI sama dengan gambar 2.5c – sub-bab 2.2 (gambar 4.1). VSI ini menggunakan kendali arus (CC-VSI).



Gambar 4.1. Rangkaian VSI tiga-fasa empat-kawat

Sama seperti APF, CC-VSI untuk transfer energi surya juga dilengkapi dua buah loop kendali yaitu loop kendali arus dan loop kendali tegangan. Loop kendali arus terdiri dari sensor arus pada sisi

jaringan listrik (*grid*), arus referensi *grid*, rangkaian *polarized ramp-time current control* (PRCC) dan sisi AC dari VSI. Sedangkan loop kendali tegangan terdiri dari sensor tegangan DC-bus, tegangan referensi DC-bus, rangkaian kendali *Proportional Integral* (PI) dan sisi DC dari VSI. Jadi diagram blok transfer energi surya mengadopsi konfigurasi pada gambar 3.5 (sub-bab 3.4).

4.2 Model Sederhana Panel Surya (*Photovoltaic – PV*)

Secara umum sel surya adalah komponen semikonduktor yang terdiri dari tipe p dan tipe n. Pertemuan kedua tipe semikonduktor ini yaitu *p-n junction* menimbulkan medan listrik. Pada saat kondisi gelap atau tidak cukup cahaya komponen semikonduktor ini berfungsi seperti dioda. Tetapi pada saat disinari dengan cahaya matahari, efek foton mampu menggerakkan elektron pada *p-n junction* dan menghasilkan arus listrik.

Karena itu model sederhana sel surya (PV) dikembangkan dari arus yang dihasilkannya seperti pada dioda [1] yaitu:

$$I = I_{sc} - I_0 \left(\exp\left(\frac{V}{V_T}\right) - 1 \right) \quad (4.1)$$

Dimana:

I [A] dan V [V] arus dan tegangan keluaran panel PV.

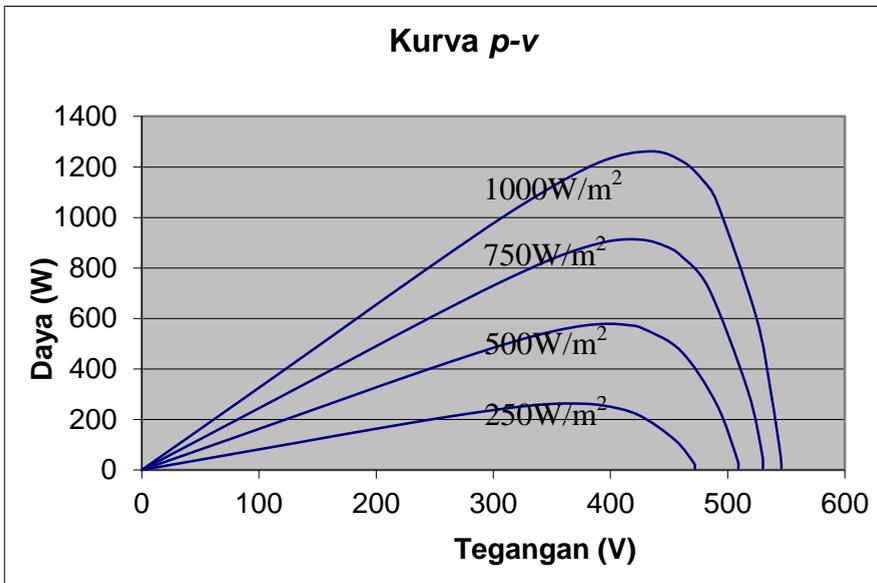
I_{sc} [A] adalah arus hubung singkat panel PV yang terkait dengan kerapatan daya dari radiasi sinar matahari (*irradiance*) p_p [kW/m²].

V_T [V] adalah tegangan termal.

I_0 [A] adalah arus saturasi balik.

Persamaan (4.1) diterapkan pada panel surya milik Power Electronic Laboratory, Sophia University, Jepang (Fuji Electric® Co. ELR-615-160Z) [7-10] dan diperoleh:

Dari persamaan (4.4), dapat dibangun sumber tegangan tak bebas yang nilainya tergantung dari radiasi sinar matahari (p_p) dan variabel arus keluaran panel (I). Untuk $N = 25$, $M = 1$ dengan radiasi yang merata, model/sub-rangkaian untuk susunan panel surya berdasarkan model PSIM digambarkan dalam gambar 4.2. Dengan membuat susunan panel PV sebagai model sumber tegangan tak bebas, terminal keluarannya (DC) dengan mudah dapat dihubungkan dengan DC-bus dari CC-VSI. Sebagai informasi tambahan, ada dioda *blocking* untuk mencegah arus balik, dan dioda *bypass* pada setiap sel untuk mencegah masalah aliran arus pada panel surya bila ada sel yang tidak bekerja dengan benar atau rusak.



Gambar 4.3. Kurva p-v dari model panel surya pada gambar 4.2

Tabel 4.1. Tingkat Insolation/radiasi dan Keluaran Panel PV

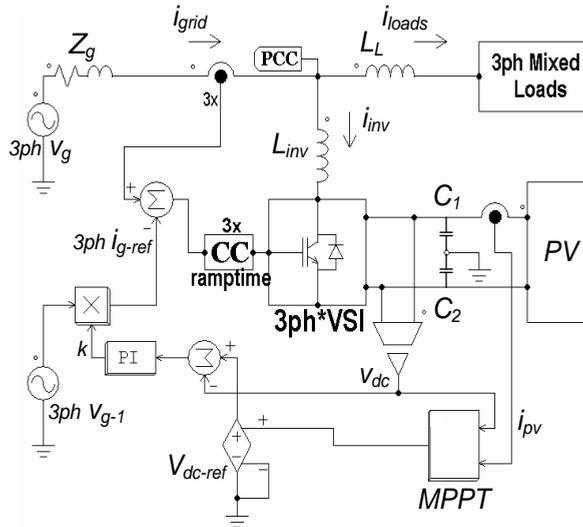
Radiasi (kW/m²)	Tegangan Keluaran (V)	Daya Maksimum (W)
1	2	3
1	430.8	1262.5
0.95	429.8	1191.9
0.9	425.0	1121.8
0.85	422.9	1052.1
0.8	420.6	982.9
0.75	416.7	914.1
0.7	414.4	845.9
0.65	410.1	778.1
0.6	408.7	711.1
0.55	403.8	644.6
0.5	399.7	578.8
0.45	393.2	513.8
0.4	388.1	449.6
0.35	383.2	386.4
0.3	375.6	324.3

Dari model sederhana panel surya pada gambar 4.2, untuk satu tingkat/nilai radiasi matahari, dapat dihitung daya keluaran panel surya untuk berbagai nilai beban. Daya keluaran panel surya adalah perkalian antara arus dan tegangan keluarannya. Kurva $p-v$ menggambarkan daya keluaran panel PV sebagai fungsi tegangan keluarannya, $p = f(v)$. Dari gambar 4.3 terlihat bentuk kurva $p-v$ untuk beberapa tingkat radiasi matahari.

Dari gambar 4.2 dan 4.3, dapat ditentukan daya keluaran maksimum (puncak kurva) untuk setiap tingkat radiasi. Tabel 4.1 memuat daftar daya keluaran maksimum panel PV dan tegangan keluaran panel PV yang bersesuaian untuk berbagai tingkat radiasi matahari.

4.3 Model Terintegrasi

Gambar 4.4 [7-10] menunjukkan integrasi dari model atau rangkaian APF tipe paralel (konfigurasi gambar 3.5) dan model panel surya (gambar 4.2) yang dibentuk dalam model PSIM. Terminal keluaran panel surya dihubungkan paralel dengan kapasitor DC-bus CC-VSI. Jadi, CC-VSI berfungsi sebagai filter daya aktif dan sebagai transfer energi surya ke jaringan listrik. Gabungan APF dan transfer energi surya dapat juga dilihat pada beberapa literatur [2][3]. Tetapi pada buku ini disajikan metoda baru yang lebih sederhana dan efektif serta mudah implementasinya.



Gambar 4.4. Model Terintegrasi (APF dan panel PV)

Sistem pembangkit tenaga surya terdiri dari 25 panel surya yang terhubung seri ($N = 25$, $M = 1$). Hal ini dimaksudkan agar besarnya tegangan keluaran sesuai dengan syarat minimum besarnya tegangan DC-bus. Nilai tegangan DC-bus harus lebih besar dari dua kali nilai puncak tegangan *grid* sesuai dengan syarat kondisi untuk beroperasi (sub-bab 3.5.1). Jika syarat ini tidak dipenuhi, CC-VSI tidak dapat beroperasi dan tidak sanggup mengirimkan arus ke jaringan listrik.

Model terintegrasi diatas didukung oleh rangkaian *maximum power point tracking* (MPPT) sebagai bagian dari panel surya. Tetapi kendali rangkaian MPPT terpisah dari loop kendali arus dan loop kendali tegangan dari CC-VSI. Rangkaian MPPT berfungsi menentukan nilai tegangan referensi DC-bus seperti terlihat pada gambar 4.4.

4.4 *Maximum Power Point Tracking (MPPT) untuk panel surya (PV)*

Rangkaian MPPT diperlukan agar panel surya menghasilkan daya maksimum sesuai dengan intensitas radiasi matahari yang diterimanya. Sinyal masukan rangkaian MPPT adalah tegangan dan arus keluaran panel surya atau sama dengan daya aktif yang dibangkitkan. Sedangkan keluarannya adalah sebuah tegangan DC yang akan menjadi nilai tegangan referensi DC-bus CC-VSI. Besarnya tegangan referensi ini menjadi acuan besarnya tegangan DC-bus, dan juga tegangan keluaran panel surya karena terminal keluaran panel surya terhubung dengan DC-bus. Karena itu, rangkaian MPPT berusaha menghasilkan tegangan referensi DC-bus CC-VSI yang bersesuaian dengan daya keluaran maksimum panel surya. Fluktuasi radiasi sinar matahari akan mengakibatkan tegangan keluaran rangkaian MPPT dan juga tegangan referensi DC-bus bervariasi.

Selanjutnya, rangkaian PI dalam loop kendali tegangan akan mengontrol dan menjaga tegangan DC-bus CC-VSI agar sama dengan tegangan referensi tersebut. Loop kendali tegangan dari CC-VSI juga berfungsi menjaga keseimbangan daya aktif dalam sistem yaitu antara jaringan listrik, panel surya (PV inverter) dan beban listrik seperti pada persamaan (3.14 – sub-bab 3.6.2).

Untuk mendapatkan daya maksimum dari panel surya (PV), dikembangkan beberapa algoritma untuk rangkaian MPPT [4][5][6]. Dalam buku ini, ada empat algoritma yang dibuat dan diaplikasikan pada sistem. Setiap algoritma diimplementasikan dengan sub-rangkaian yang khusus.

4.4.1 Algoritma Look-up Table

Pada algoritma ini [7], *Look-up Table block* digunakan untuk menyimpan daftar dua kolom data yang saling berhubungan. Dalam hal ini data yang disimpan adalah tingkat radiasi (*irradiance* – W/m^2) sebagai data masukan (kolom 1), dan tegangan keluaran panel surya sebagai data keluaran (kolom 2). Data tegangan keluaran panel PV sesuai dengan daya maksimum yang dihasilkannya. Data masukan dan keluaran mempunyai hubungan 1 – 1. Data ini diambil dari Tabel 4.1 kolom 1 (tingkat radiasi) dan kolom 2 (tegangan panel PV) dan disimpan dalam dua kolom data *look-up table*. Jika nilai radiasi berada diantara 2 data radiasi yang tersedia, maka secara interpolasi diperoleh tegangan keluaran yang bersesuaian.

Merujuk pada sub-bab 3.5.1 dan gambar 4.3, rentang tegangan keluaran dibatasi antara 376V dan 441V. Tegangan minimum DC-bus dibatasi sebesar 376V karena terkait syarat operasi untuk CC-VSI. Karena itu, untuk tingkat radiasi yang rendah (dibawah $300W/m^2$), tegangan DC-bus tetap 376V sehingga rangkaian MPPT bekerja secara tidak benar dan daya yang dibangkitkan tidak maksimum. Sedangkan tegangan keluaran maksimum dibatasi sebesar 441V untuk menjaga terjadinya *insulation stress* yang berlebihan dari saklar semikonduktor.

Diagram untuk algoritma *look-up table* sedikit berbeda dengan gambar 4.4. Sinyal masukan rangkaian MPPT bukan tegangan dan arus. Yang dibutuhkan adalah pengukuran tingkat radiasi matahari yang menjadi masukan *Look-up Table block*. Kemudian, *block* ini langsung mencari kesetaraan intensitas radiasi matahari dengan tegangan keluaran panel surya dalam daftar dua kolom data. Tegangan ini menjadi keluaran dari *Look-up Table block* dan dijadikan tegangan referensi DC-bus. Sistem ini bersifat open loop. Bila data dan model yang dibuat akurat, maka daya maksimum panel surya dapat dibangkitkan dengan mudah dan dikirim ke *grid*.

4.4.2 Algoritma Hill Climbing

Ide dasar algoritma Hill Climbing adalah daya maksimum yang dibangkitkan panel surya tercapai bila dp/dv dari kurva $p = f(v)$ sama dengan nol. Hal ini berarti sama dengan ‘mendaki’ kurva $p-v$ untuk mencapai titik puncaknya. Rangkaian MPPT mencari nilai daya maksimum dengan merubah tegangan keluarannya (= tegangan referensi DC-bus) sambil mendeteksi perubahan tegangan dan daya keluaran panel PV [8]. Dari kurva $p-v$, ada empat kemungkinan kerja/aksi untuk merubah (menambah atau mengurangi) tegangan keluaran rangkaian MPPT seperti yang tertulis dalam tabel 4.2.

Pada kenyataannya dp/dv tidak pernah sama dengan nol. Daya keluaran panel PV terus menerus dicari nilai maksimumnya dengan selalu merubah tegangan keluaran MPPT. Dalam kondisi *steady state*, sistem akan berosilasi di sekitar harga pucak/maksimum.

Nilai dp/dv dicari dengan proses *sampling* terhadap tegangan dan daya keluaran panel PV. Kemudian, dihitung perbedaan nilai daya dan tegangan untuk dua waktu yang berurutan sehingga diperoleh ΔP dan ΔV . Frekuensi *sampling* dipilih sesuai dengan frekuensi *ripple* dari tegangan DC-bus. Untuk sistem AC 50Hz, frekuensi *sampling* dipilih 100Hz. Jadi, proses *sampling* juga berfungsi sebagai filter terhadap *ripple*.

Tabel 4.2. Kerja/aksi Algoritma Hill Climbing

ΔP	ΔV	Tegangan keluaran MPPT
Positif	Positif	Bertambah ($+\Delta V$)
Positif	Negatif	Berkurang ($-\Delta V$)
Negatif	Positif	Berkurang ($-\Delta V$)
Negatif	Negatif	Bertambah ($+\Delta V$)

Pemilihan nilai ΔV memperhatikan hal berikut. Nilai ΔV yang besar akan mendorong sistem mencapai kondisi *steady state* atau puncak dengan cepat, tetapi daya dan tegangan keluaran panel PV akan berosilasi dengan amplitudo yang besar. Sebaliknya, nilai ΔV yang kecil mengakibatkan sistem menuju konvergensi (nilai maksimum) lebih perlahan, tetapi daya dan tegangan panel PV akan berosilasi dengan amplitudo yang kecil.

4.4.3 Algoritma Pencarian Fibonacci

Bilangan Fibonacci adalah deretan/barisan bilangan yang terjadi secara berulang dengan pola sebagai berikut: deretan bilangan ini mulai dari 0 dan 1, kemudian bilangan berikutnya didapat dengan cara menambahkan kedua bilangan yang berurutan sebelumnya [10]. Contoh penyusunan 5 bilangan Fibonacci yang pertama adalah 0, 1, 1 (= 0 + 1), 2 (= 1 + 1), 3 (= 1 + 2). Untuk bilangan yang bernilai besar, perbandingan antara 2 bilangan yang berurutan bernilai tetap dan mendekati 1,618.

Algoritma ini [9][11] secara iterasi melakukan lokalisasi daerah pencarian titik maksimum. Proses lokalisasi ditetapkan dari evaluasi nilai fungsi terhadap dua titik pada daerah pencarian. Gambar 4.5 menunjukkan proses pencarian titik maksimum.

Dalam algoritma ini, penentuan 2 titik tersebut dan rentang daerah pencarian menggunakan deret bilangan Fibonacci yang dinyatakan oleh persamaan (4.5).

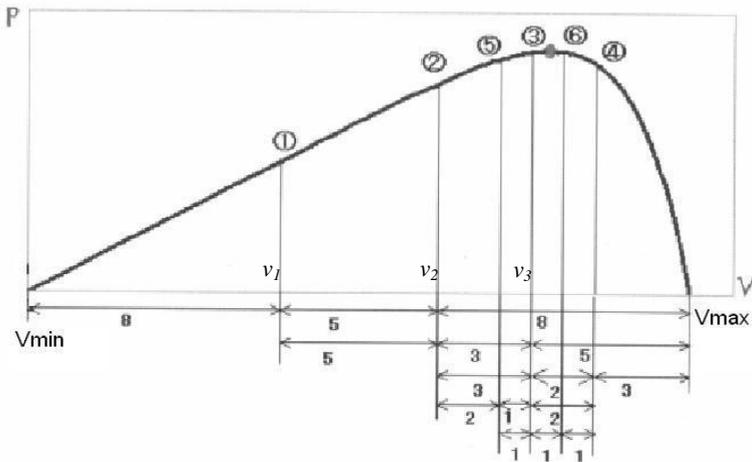
$$\begin{aligned}c_{n+2} &= c_{n+1} + c_n \quad (n = 1, 2, \dots) \\c_1 &= c_2 = 1\end{aligned}\tag{4.5}$$

Hasil deretan bilangannya adalah sebagai berikut:

$$c_3 = 2, c_4 = 3, c_5 = 5, c_6 = 8, c_7 = 13, \dots\tag{4.6}$$

Gambar 4.5 menunjukkan kurva $p-v$ dari panel PV dengan rentang daerah pencarian titik maksimum adalah $[V_{\min}, V_{\max}]$. Awalnya, dua titik dalam rentangan ini yaitu v_1 dan v_2 dipilih untuk mengevaluasi fungsi $f(v)$. Variabel v adalah tegangan referensi DC-bus dan $f(v)$ adalah daya keluaran panel PV. Jarak titik-titik tersebut ditentukan oleh deret bilangan Fibonacci sesuai persamaan (4.6). Jarak V_{\min} ke $v_1 = 8$, v_1 ke $v_2 = 5$, v_2 ke $V_{\max} = 8$.

Jika $f(v_1) < f(v_2)$, maka titik maksimum $f(v_2)$ terjadi antara rentangan $[v_1, V_{\max}]$. Kemudian ditetapkan nilai $v_1 = V_{\min}$ serta $V_{\max} = V_{\max}$. Untuk pencarian lanjutan (iterasi berikutnya), pencarian titik maksimum menggunakan rentangan yang baru yaitu $[v_1, V_{\max}]$. Jika sebaliknya $f(v_1) > f(v_2)$, maka titik maksimum $f(v_1)$ terjadi antara rentangan $[V_{\min}, v_2]$. Lalu ditetapkan $V_{\min} = V_{\min}$ dan $v_2 = V_{\max}$ untuk batas daerah pencarian titik maksimum berikutnya.



Gambar 4.5. Proses Pencarian Titik Maksimum dengan Fibonacci

Dari gambar terlihat jelas bahwa $f(v_1) < f(v_2)$. Titik maksimum adalah $f(v_2)$. Untuk iterasi berikutnya, daerah rentangan yang baru

adalah $[v_1, V_{\max}]$. Selanjutnya, dua titik baru (v_2 dan v_3) dalam daerah pencarian $[v_1, V_{\max}]$ dipilih untuk mengevaluasi fungsi $f(v)$ yaitu $f(v_2)$ dan $f(v_3)$, demikian seterusnya. Terlihat pada gambar 4.5 bahwa angka-angka diatas kurva $p-v$ menyatakan urutan iterasi pencarian untuk mendapatkan daya maksimum.

Jarak titik-titik pencarian ditentukan oleh bilangan Fibonacci. Dari gambar 4.5, panjang rentangan $[V_{\min}, V_{\max}]$ dibagi menjadi

$$\begin{aligned} [V_{\min}, v_1] &= [v_2, V_{\max}] = a_i = c_n, \\ [v_1, v_2] &= b_i = c_{n-1} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Nilai a_{i+1} dan b_{i+1} dapat ditentukan untuk iterasi berikutnya sebagai

$$a_{i+1} = c_{n-1} (= b_i), \quad b_{i+1} = c_{n-2} \quad (4.8)$$

Dari gambar 4.5, angka-angka dibawah kurva $p-v$ menyatakan deret bilangan Fibonacci sebagai jarak titik-titik pencarian yang kemudian menjadi panjang rentangan. Pada contoh ini, bilangan Fibonacci dimulai dari $n = 6$ dan $c_6 = 8$. Pada setiap iterasi, panjang rentangan menyempit (konvergen) sesuai dengan deret bilangan Fibonacci. Pencarian mencapai konvergensi ketika $n = 1$. Dalam kondisi *steady state*, sistem beresilasi di sekitar harga maksimum.

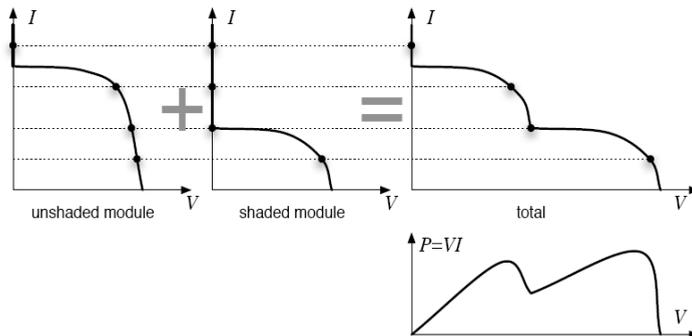
Untuk mencari titik daya maksimum (MPP), deret bilangan Fibonacci dimungkinkan bergeser kearah yang berkebalikan. MPP mungkin bergerak keluar dari daerah pencarian karena perubahan tiba-tiba dari intensitas radiasi matahari. Dalam kasus ini, daerah pencarian dimungkinkan melebar. Secara praktis, proses pencarian melebar terjadi ketika rentangannya bergeser ke arah yang sama beberapa kali (lebih dari batas M kali) dan deret bilangan Fibonacci belum mencapai nilai yang terakhir. Proses pelebaran dapat direalisasikan dengan membalik proses pada gambar 4.5. Untuk iterasi berikutnya, nilai a_{i+1} dan b_{i+1} menjadi

$$a_{i+1} = c_{n+1}, \quad b_{i+1} = c_n (= a_i) \quad (4.9)$$

Sama dengan algoritma *Look-up Table*, tegangan referensi DC-bus dibatasi antara 376V dan 441V. Diluar batas tersebut, pencarian daya maksimum dengan Fibonacci tidak akan berhasil mendapatkan titik maksimum.

4.4.4 Algoritma Particle Swarm Optimization (PSO)

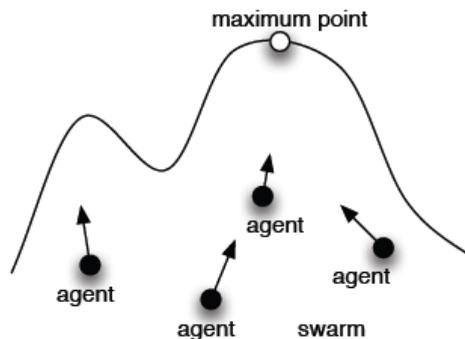
Algoritma-algoritma yang disebutkan sebelumnya cocok untuk kondisi dimana hanya terdapat satu titik daya maksimum (MPP). Kondisi satu MPP terjadi bila setiap sel atau panel dari susunan panel PV mendapatkan sinar matahari yang sama. Kadang-kadang, bayangan gedung atau pohon menghalangi sinar matahari mengenai beberapa sel atau panel dari susunan panel PV. Akibatnya, panel yang terhalang tadi (*shaded module*) menghasilkan arus yang nilainya lebih kecil dari panel yang mendapat sinar matahari langsung (*unshaded module*). Jika kedua macam panel tersebut disambung secara seri-paralel, maka beberapa MPP lokal sering timbul dalam karakteristik atau kurva *p-v*. Pada gambar 4.6 terlihat ada 2 buah MPP lokal.



Gambar 4.6. Beberapa MPP Lokal karena panel PV terhalang sebagian

Dibawah kondisi tersebut, algoritma-algoritma sebelumnya dapat melakukan kesalahan pencarian titik daya maksimum. Ada kemungkinan algoritma-algoritma tersebut tidak bisa mendapatkan MPP yang sesungguhnya yaitu yang tertinggi.

Untuk mengatasi hal ini, ada algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) yang sederhana dan efektif untuk sistem yang mempunyai banyak MPP lokal [13][14]. Algoritma PSO biasa digunakan untuk menyelesaikan persoalan optimasi. Algoritma ini terinspirasi dari perilaku sosial kolektif dari kelompok binatang, seperti burung dan ikan. Setiap perilaku individu dipengaruhi oleh kecerdasannya sendiri dan juga dipengaruhi oleh individu lain dalam suatu kelompok. Misalnya, jika seekor burung menemukan jalan yang tepat atau pendek menuju ke sumber makanan, maka sisa anggota kelompok juga dapat segera mengikuti jalan tersebut meskipun lokasi mereka jauh dari sumber makanan tersebut [12].



Gambar 4.7. Proses Pencarian Titik Maksimum oleh Agen dengan PSO

Algoritma PSO menggunakan beberapa individu atau agen yang dapat bekerjasama (*cooperative agents*). Setiap agen saling membagikan informasi yang diperoleh selama proses pencarian titik maksimum (gambar 4.7). Setiap agen bergerak dari satu posisi ke

posisi yang lain dengan kecepatan (v_i^k). Kecepatan gerak (v_i^k) dan posisi (s_i^k) dari agen-agen akan selalu diperbarui melalui proses iterasi dengan

$$v_i^{k+1} = wv_i^k + c_1 r_1 p_{best-i} + c_2 r_2 g_{best} \quad (4.10)$$

$$s_i^{k+1} = s_i^k + v_i^{k+1} \quad (4.11)$$

dimana w adalah faktor momentum; c_1 dan c_2 adalah konstanta positif dari *learning rate*; r_1 dan r_2 adalah angka acak yang nilainya antara (0 – 1). Variabel p_{best-i} digunakan untuk mengingat (memori) posisi terbaik yaitu posisi yang mempunyai nilai fungsi objektif paling tinggi yang telah ditemukan agen ke- i selama ini. Kemudian data posisi ini akan diperbarui dengan (4.12) jika kondisi (4.13) dipenuhi.

$$p_{best-i} = s_i^k \quad (4.12)$$

$$f(s_i^k) > f(p_{best-i}) \quad (4.13)$$

Untuk rangkaian MPPT, posisi agen (s_i^k) berarti tegangan DC-bus, yang mana ditentukan oleh tegangan referensi DC-bus. Variabel $f(s_i^k)$ adalah fungsi objektif yang akan dicari yaitu daya keluaran panel PV (MPP). Variabel g_{best} digunakan untuk mengingat posisi terbaik yang dicapai dari antara semua agen yaitu merupakan yang terbaik dari semua p_{best} . Pada posisi g_{best} , nilai fungsi objektif adalah yang tertinggi. Dengan demikian, daya maksimum yang tertinggi (MPP global) dapat diperoleh dari beberapa daya maksimum lokal.

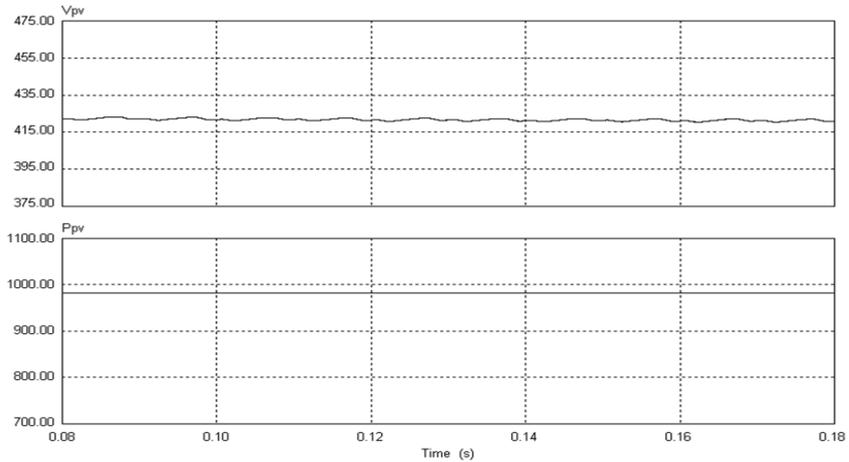
4.5 Hasil Simulasi dan Evaluasi Sistem

Simulasi komputer dilakukan terhadap model terintegrasi yang sudah dibuat (gambar 4.4) untuk membuktikan bahwa CC-VSI dapat

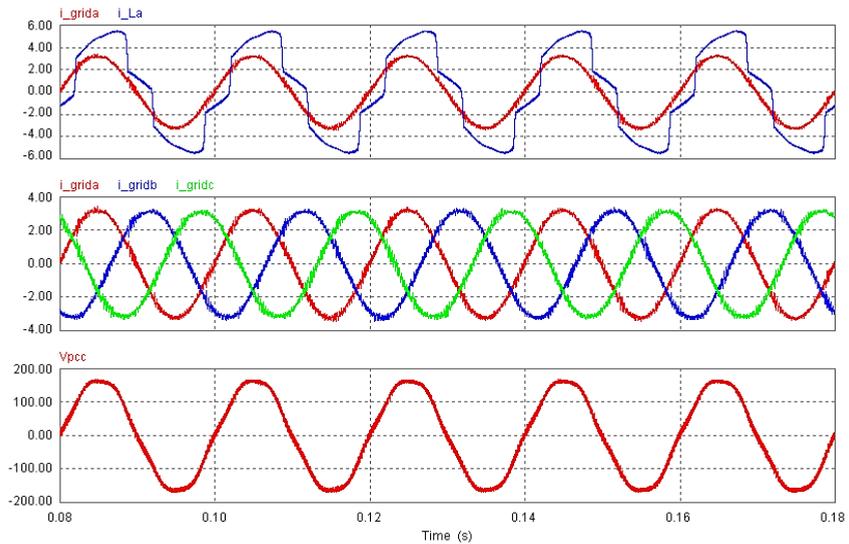
berfungsi sebagai filter daya aktif (APF) dan sebagai pengiriman daya aktif dari panel surya ke jaringan listrik. Model terintegrasi dilengkapi dengan MPPT sehingga panel surya menghasilkan daya maksimum. Berikut ini dijabarkan hasil simulasi komputer dengan PSIM dari sistem diatas untuk setiap algoritma MPPT.

4.5.1 Algoritma Look-up Table.

Tegangan keluaran panel PV, yang sama dengan tegangan DC-bus inverter, dan daya keluaran panel PV ditunjukkan dalam gambar 4.8 dalam kondisi *steady state* untuk radiasi 0.8kW/m^2 . *Look-up table block* mengkonversikan tingkat radiasi matahari ke tegangan DC dengan menggunakan dua kolom data. Tegangan DC ini menjadi tegangan referensi DC-bus. Kemudian, tegangan DC-bus inverter menjadi sama dengan tegangan referensi tersebut karena rangkaian kendali PI dalam loop kendali tegangan bekerja. Pada tegangan ini, susunan panel PV membangkitkan daya maksimum sesuai dengan tingkat radiasinya. Gambar 4.8 memperlihatkan bahwa tegangan keluaran panel surya sebesar 420.6V dan daya maksimum yang dihasilkan sebesar 982.9W . Kedua angka ini bersesuaian dengan tingkat radiasi matahari sebesar 0.8kW/m^2 . Angka-angka ini cocok dengan data *Look-up Table* dalam tabel 4.1.



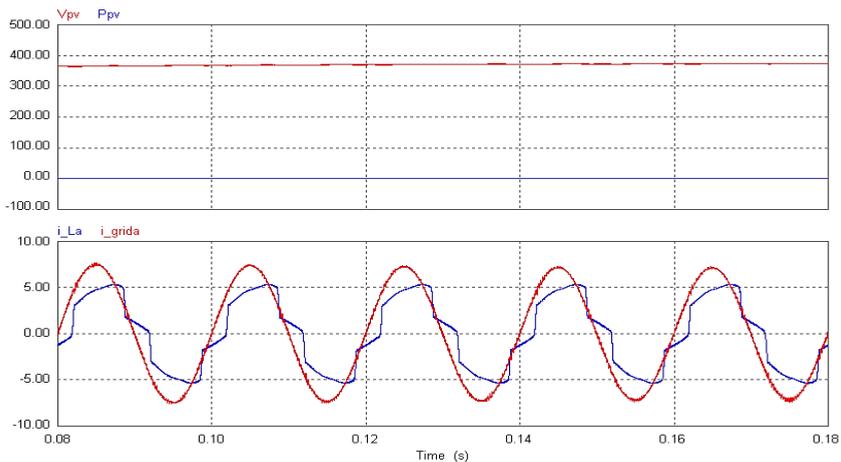
Gambar 4.8. Tegangan (atas) dan daya keluaran maksimum (bawah) panel PV ($p_p = 0.8\text{kW/m}^2$)



Gambar 4.9. Arus grid dan arus beban (fasa A) (atas); Arus grid tiga fasa (tengah); Tegangan grid (fasa A) (bawah)

Gambar 4.9 (atas) menggambarkan arus beban (gelombang sinus) dan arus *grid* (gelombang terdistorsi) untuk fasa A. Terlihat jelas bahwa arus *grid* lebih kecil dari arus beban. Hal ini karena beban disuplai oleh jaringan listrik dan panel surya (menghasilkan daya maksimum). Gambar 4.9 (tengah) menunjukkan arus *grid* tiga fasa berbentuk sinus, seimbang, dan sefasa dengan tegangan *grid* karena kerja dari filter daya aktif (APF).

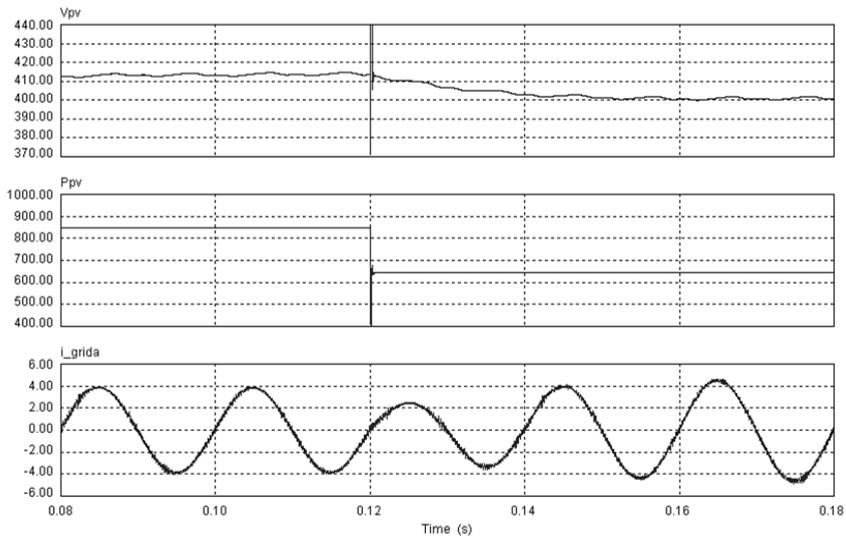
Ketika tingkat radiasi dibawah 0.3kW/m^2 , tegangan DC-bus inverter ditahan pada 376V agar sistem tetap stabil. Akibatnya pengendali MPPT tidak dapat mencari MPP. Bila tingkat radiasi sama dengan nol (malam hari), panel surya tidak membangkitkan daya. Tegangan referensi, tegangan DC-bus inverter dan tegangan keluaran PV menjadi 376V. Akibatnya, CC-VSI hanya bekerja sebagai APF dan arus beban hanya disuplai oleh jaringan listrik. Gambar 4.10 menunjukkan kondisi tegangan dan daya keluaran panel PV, arus *grid* (gelombang sinusoidal) dan arus beban (gelombang terdistorsi) untuk fasa A pada saat tingkat radiasi sama dengan nol.



Gambar 4.10. Tegangan dan daya keluaran panel PV (atas) pada tingkat radiasi sama dengan nol; Arus grid dan arus beban (bawah)

Gambar 4.11 menunjukkan perubahan tegangan dan daya keluaran panel PV, serta arus *grid* ketika terjadi perubahan tingkat radiasi (0.7kW/m^2 ke 0.55kW/m^2). Setelah perubahan, amplitudo arus *grid* terlihat naik karena suplai daya dari panel PV berkurang. Rangkaian MPPT dan juga loop kendali tegangan bereaksi cepat dan akurat untuk mencapai titik daya maksimum yang baru dan keseimbangan daya aktif sistem yang baru.

Jadi terlihat dari kondisi *steady state* dan dinamis, terbukti bahwa algoritma *Look-up Table* bekerja dengan sangat baik. CC-VSI mampu bekerja dengan sangat baik sebagai APF dan transfer energi surya dari panel surya.

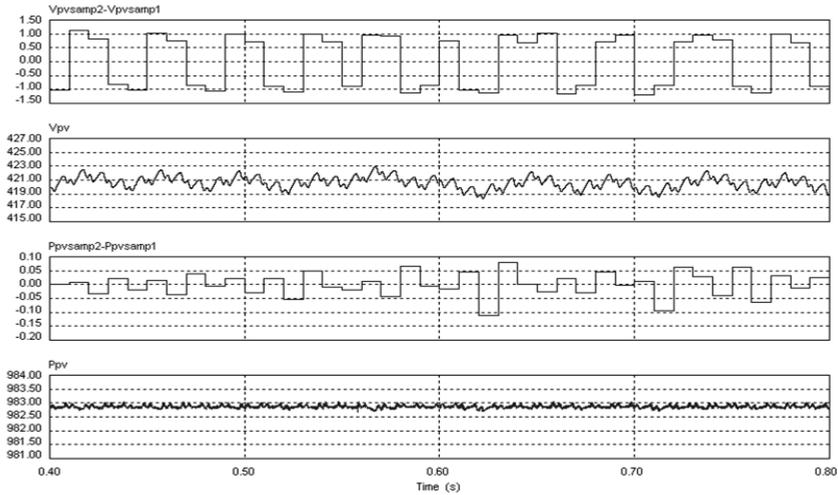


Gambar 4.11. Tegangan (atas) dan daya keluaran (tengah) panel PV, dan arus grid (fasa A)(bawah) ketika tingkat radiasi matahari berubah

4.5.2 Algoritma Hill Climbing

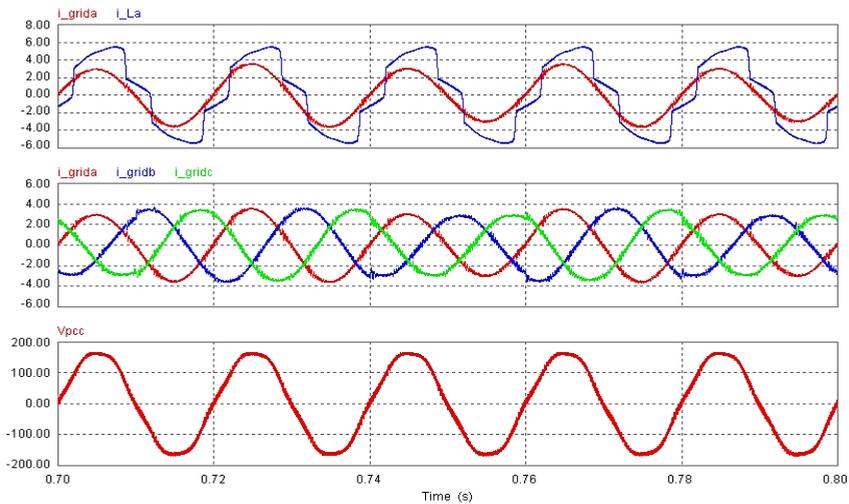
Gambar 4.12 menunjukkan tegangan dan daya keluaran panel PV dalam kondisi *steady state* untuk tingkat radiasi 0.8kW/m^2 . Dari gambar terlihat bahwa pengendali MPPT mampu mendorong daya keluaran panel PV mencapai puncak kurva $p-v$ dan mendapatkan nilai daya maksimum. Tegangan rata-rata keluaran panel PV dan daya maksimum rata-rata yang dibangkitkan panel surya sudah sesuai dengan tingkat radiasi yang tercantum pada tabel 4.1.

Prosedur pengendalian MPP mengikuti aturan dalam tabel 4.2. Gambar 4.12 menunjukkan ΔV dan ΔP yang menentukan kerja/aksi pengendali. Pada kasus ini, ΔV dipilih 2V dan frekwensi sampling adalah 100Hz. Pada kondisi *steady state*, terlihat dari gambar 4.12 bahwa ΔV dan ΔP berosilasi positif-negatif. Hal ini berarti tegangan referensi berosilasi kanan-kiri disekitar tegangan yang menghasilkan harga puncak. Akibatnya daya keluaran panel PV naik-turun disekitar harga pucak seperti yang diperkirakan semula.



Gambar 4.12. Variabel keluaran panel PV: ΔV ; Tegangan keluaran PV; ΔP ; Daya keluaran PV (gambar dari atas ke bawah)

Gambar 4.13 (atas) menggambarkan arus beban (gelombang terdistorsi) dan arus *grid* (gelombang sinusoidal) untuk fasa A. Arus *grid* lebih kecil dari arus beban karena beban listrik disuplai oleh *grid* dan panel PV. Selanjutnya, gambar 4.13 (tengah) menunjukkan arus *grid* tiga fasa berbentuk sinus, seimbang dan sefasa dengan tegangan *grid* karena operasi APF. Arus *grid* juga beresilasi karena tegangan referensi, tegangan DC-bus inverter dan daya keluaran panel PV beresilasi. Kondisi ini dapat mengakibatkan timbulnya arus sub-harmonisa pada jaringan listrik.



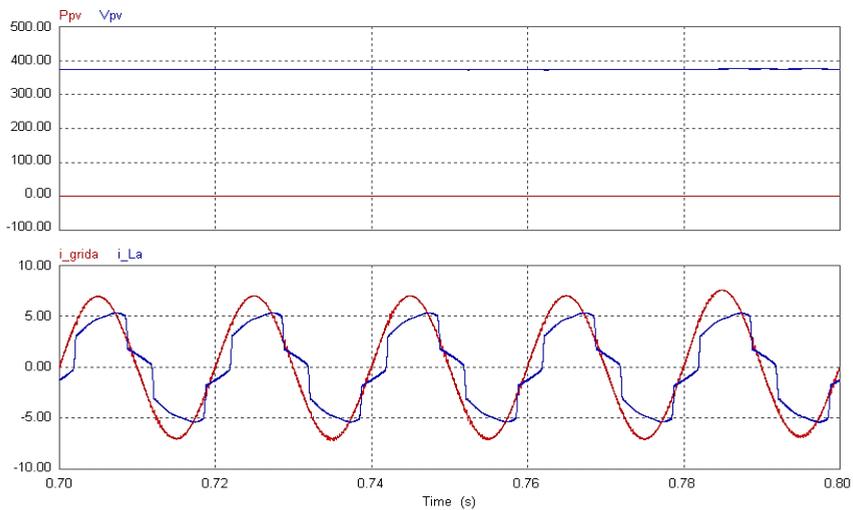
Gambar 4.13. Arus grid dan arus beban (atas); Arus grid tiga fasa (tengah); Tegangan grid (fasa A) (bawah)

Ketika tingkat radiasi dibawah 0.3kW/m^2 , tegangan DC-bus inverter ditahan pada 376V dan pengendali MPPT tidak dapat mencari MPP. Bila tingkat radiasi sama dengan nol (malam hari), panel PV tidak membangkitkan daya listrik dan CC-VSI hanya bekerja sebagai APF. Gambar 4.14 menunjukkan kondisi tegangan dan daya keluaran panel PV, dan arus *grid* (gelombang sinusoidal) serta arus beban (gelombang terdistorsi) untuk fasa A, ketika tingkat radiasi matahari sama dengan nol.

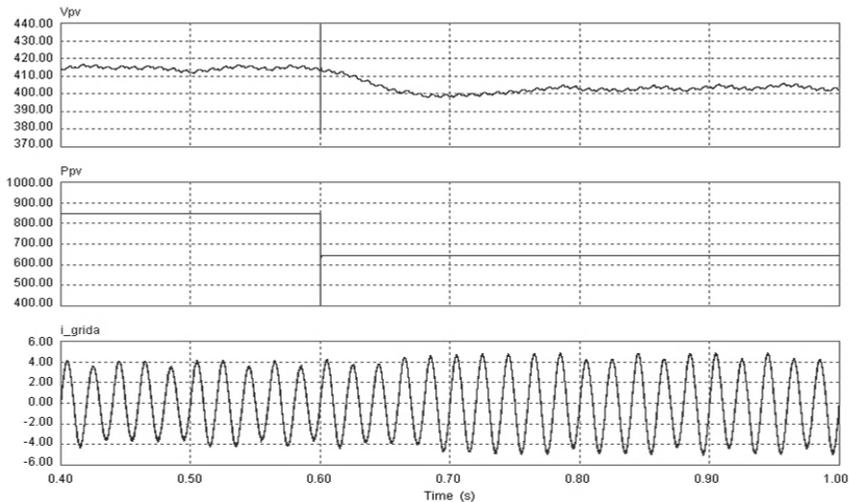
Gambar 4.15 menggambarkan tegangan dan daya keluaran panel PV, dan arus *grid* ketika terjadi perubahan tingkat radiasi (0.7kW/m^2 ke 0.55kW/m^2). Rangkaian MPPT bereaksi cepat dengan mendorong tegangan dan daya keluaran panel PV bergerak mendaki kurva *p-v* yang baru sesuai dengan tingkat radiasi yang baru untuk mencapai MPP yang baru dengan mengikuti aturan dalam tabel 4.2. Loop kendali tegangan bekerja agar tercapai keseimbangan daya aktif

sistem yang baru. Tegangan DC-bus inverter sama dengan tegangan referensi yang baru.

Jadi terlihat dari kondisi *steady state* dan dinamis, terbukti bahwa algoritma *Hill Climbing* bekerja dengan sangat baik. CC-VSI mampu bekerja dengan sangat baik sebagai APF dan transfer energi surya dari panel surya.



Gambar 4.14. Tegangan dan daya keluaran panel PV (atas) pada tingkat radiasi sama dengan nol; Arus grid dan arus beban (bawah)



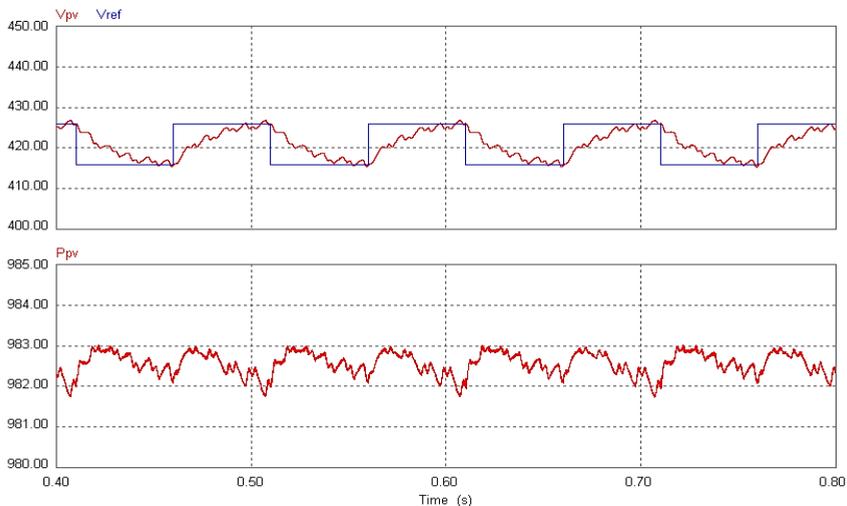
Gambar 4.15. Tegangan (atas) dan daya keluaran (tengah) panel PV, dan arus grid (fasa A)(bawah) ketika tingkat radiasi matahari berubah

4.5.3 Algoritma Pencarian Fibonacci

Gambar 4.16 menggambarkan tegangan keluaran panel PV yang mampu mengikuti tegangan referensi DC-bus yang dihasilkan oleh rangkaian MPPT, dan daya keluaran panel PV dalam kondisi *steady state* untuk tingkat radiasi matahari 0.8kW/m^2 . Dalam proses mendapatkan titik daya maksimum (MPP), rangkaian MPPT secara berulang-ulang melakukan lokalisasi daerah pencarian dengan rentangan yang sesuai dengan deret bilangan Fibonacci. Dalam kasus ini, proses dimulai dengan $n = 5$ dan $c_5 = 5$. Terlihat pada gambar bahwa tegangan rata-rata keluaran panel PV dan daya maksimum rata-rata yang dibangkitkan panel PV sudah sesuai dengan tingkat radiasi matahari yang tercantum pada tabel 4.1 .

Prosedur pencarian MPP dengan deret bilangan Fibonacci mengikuti aturan seperti dalam gambar 4.5. Daya keluaran PV

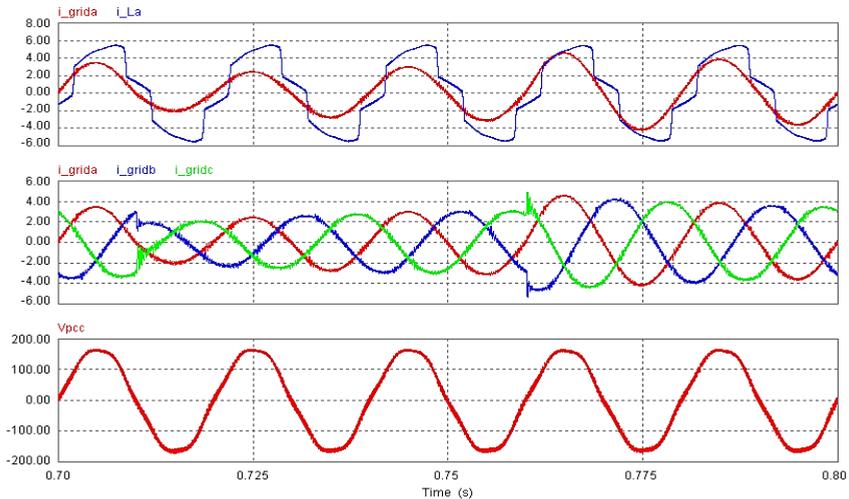
berosilasi disekitar titik daya maksimum karena proses pencarian tetap berlangsung di sekitar $n = 1$. Lebar pita osilasi tegangan keluaran PV adalah dua kali lebar rentangan per-satuan unit ($n = 1$) daerah pencarian. Dalam simulasi ini lebar rentangan per-satuan unit adalah 5V. Osilasi ini dapat menimbulkan masalah sub-harmonisa pada sistem tenaga listrik. Lebar pita osilasi tegangan keluaran PV dapat dikurangi dengan meningkatkan jumlah deretan bilangan Fibonacci. Tetapi hal ini akan meningkatkan waktu pencapaian titik puncak kurva $p-v$.



**Gambar 4.16. Tegangan keluaran panel PV dan tegangan referensinya (atas);
Daya keluaran panel PV (bawah)**

Gambar 4.17 (atas) menggambarkan arus beban (gelombang terdistorsi) dan arus *grid* (gelombang sinusoidal) untuk fasa A akibat transfer energi solar oleh CC-VSI. Terlihat jelas bahwa arus *grid* lebih kecil dari arus beban. Daya beban disuplai oleh *grid* dan oleh panel

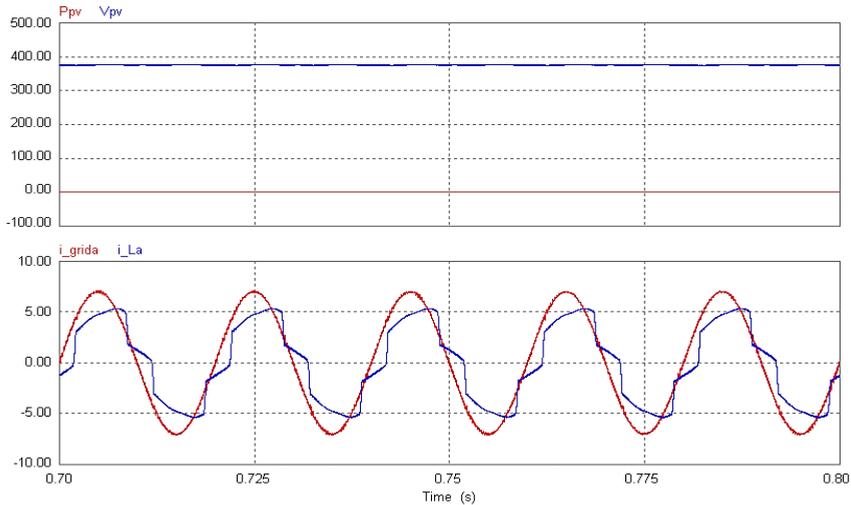
surya (membangkitkan daya maksimum). Selanjutnya, gambar 4.17 (tengah) menunjukkan bahwa walaupun beresilasi, arus *grid* tiga fasa berbentuk sinus, seimbang dan sefasa dengan tegangan *grid* karena kerja APF.



Gambar 4.17. Arus grid dan arus beban (fasa A)(atas); Arus grid tiga fasa (tengah); Tegangan grid (fasa A)(bawah)

Mirip dengan algoritma sebelumnya, ketika tingkat radiasi dibawah 0.3kW/m^2 , tegangan DC-bus inverter ditahan pada 376V dan pengendali MPPT tidak dapat mencari MPP. Bila tingkat radiasi sama dengan nol (malam hari), panel PV tidak membangkitkan daya listrik, dan rangkaian pengendali MPPT menghasilkan tegangan referensi 376V. Oleh loop kendali tegangan, tegangan keluaran PV dan juga tegangan DC-bus inverter menjadi 376V. CC-VSI hanya bekerja sebagai APF. Gambar 4.18 menunjukkan kondisi tegangan dan daya keluaran panel PV, arus *grid* (gelombang sinusoidal) dan arus beban

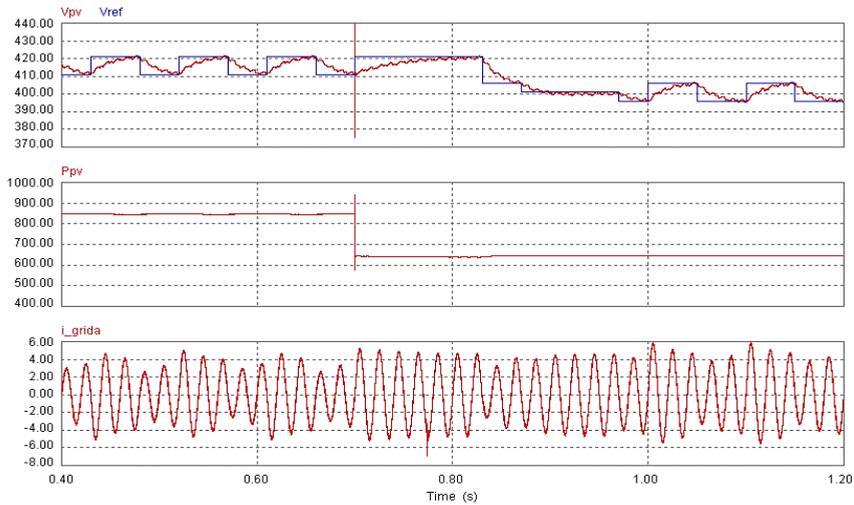
(gelombang terdistorsi) untuk fasa A pada saat tingkat radiasi sama dengan nol.



Gambar 4.18. Tegangan dan daya keluaran panel PV (atas) pada tingkat radiasi sama dengan nol; Arus grid dan arus beban (bawah)

Gambar 4.19 menunjukkan tegangan dan daya keluaran panel PV dan juga arus *grid* ketika terjadi perubahan tingkat radiasi (0.7kW/m^2 ke 0.55kW/m^2). Rangkaian MPPT bereaksi secara tepat mampu melakukan proses lokalisasi daerah pencarian sesuai dengan deret bilangan Fibonacci untuk mendapatkan MPP yang baru.

Jadi terlihat dari kondisi *steady state* dan dinamis, terbukti bahwa algoritma pencarian *Fibonacci* bekerja dengan sangat baik. CC-VSI mampu bekerja dengan sangat baik sebagai APF dan transfer energi surya dari panel surya.



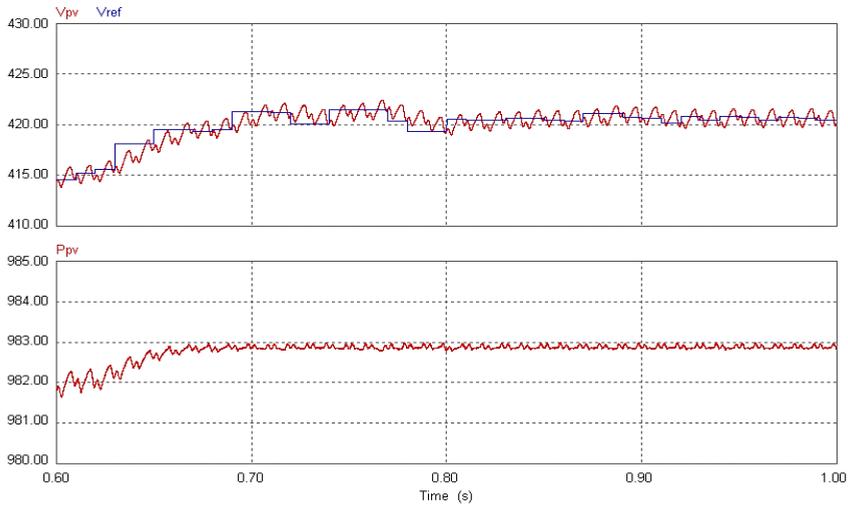
Gambar 4.19. Tegangan keluaran panel PV dan tegangan referensinya (atas); Daya panel PV (tengah); Arus grid (fasa A) (bawah) ketika tingkat radiasi matahari berubah

4.5.4 Algoritma Particle Swarm Optimization (PSO)

Dalam algoritma ini digunakan tiga agen. Proses pencarian dimulai dengan menetapkan tegangan referensi awal sebagai posisi awal dari agen. Lalu, daya keluaran panel PV sebagai fungsi obyektif $f(s_i^k)$ diukur. Seluruh agen bergerak selama proses pencarian sesuai dengan persamaan (4.10) – (4.13). Sistem konvergen ketika kecepatan agen-agen menjadi nol (biasanya dengan nilai toleransi yang kecil). Hal ini berarti semua agen telah mencapai satu titik solusi yang sama yaitu mencapai posisi titik maksimum.

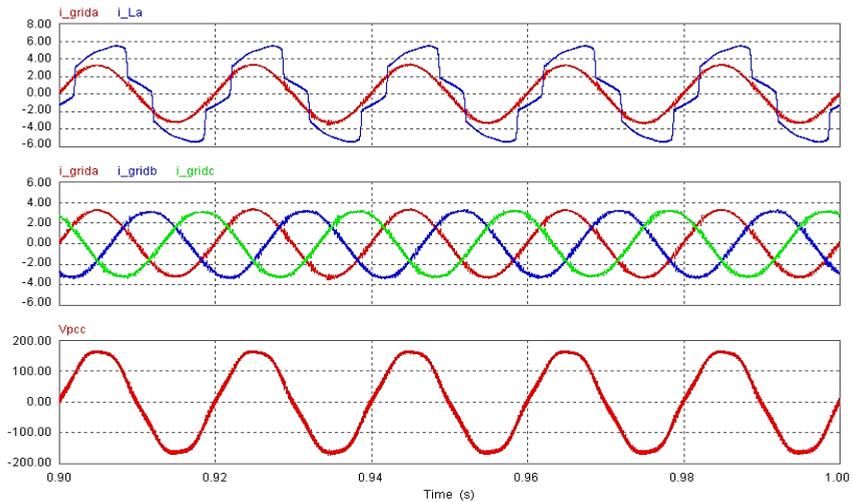
Gambar 4.20 menunjukkan pergerakan tegangan referensi sampai mencapai tegangan g_{best} pada kondisi *steady state*. Dengan adanya loop kendali tegangan, tegangan keluaran panel PV mampu

mengikuti tegangan referensi. Pada tegangan g_{best} ini panel PV menghasilkan daya maksimum. Terlihat bahwa dalam kondisi *steady state*, tegangan keluaran panel PV dan daya maksimumnya sesuai dengan tingkat radiasi 0.8kW/m^2 seperti tercantum pada tabel 4.1.

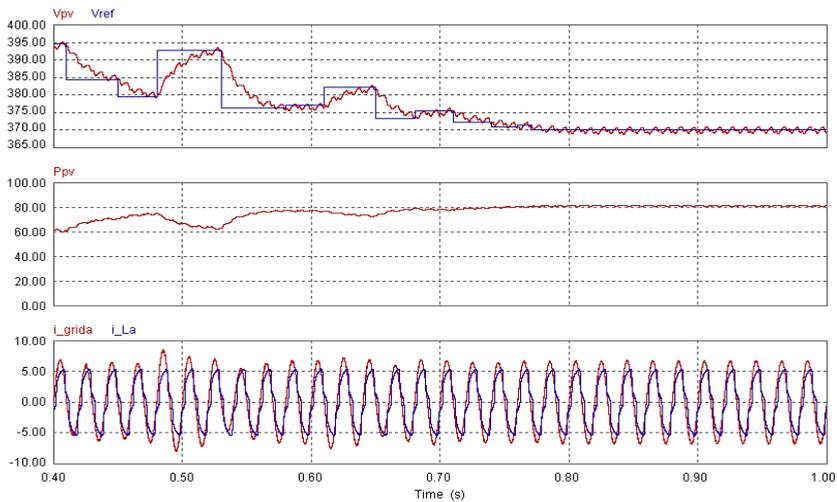


Gambar 4.20. Variabel keluaran panel PV: Tegangan referensi DC-bus dan Tegangan keluaran PV (atas); Daya keluaran PV (bawah)

Gambar 4.21 (atas) menggambarkan arus beban (gelombang terdistorsi) dan arus *grid* (gelombang sinusoidal) untuk fasa A akibat transfer energi solar oleh CC-VSI. Terlihat jelas bahwa arus *grid* lebih kecil dari arus beban. Hal ini karena beban listrik disuplai oleh jaringan listrik dan panel PV yang membangkitkan daya maksimum. Arus *grid* tiga-fasa juga berbentuk sinus, seimbang dan sefasa dengan tegangan *grid* karena kerja dari CC-VSI sebagai filter daya aktif (APF) (gambar 4.21 tengah).

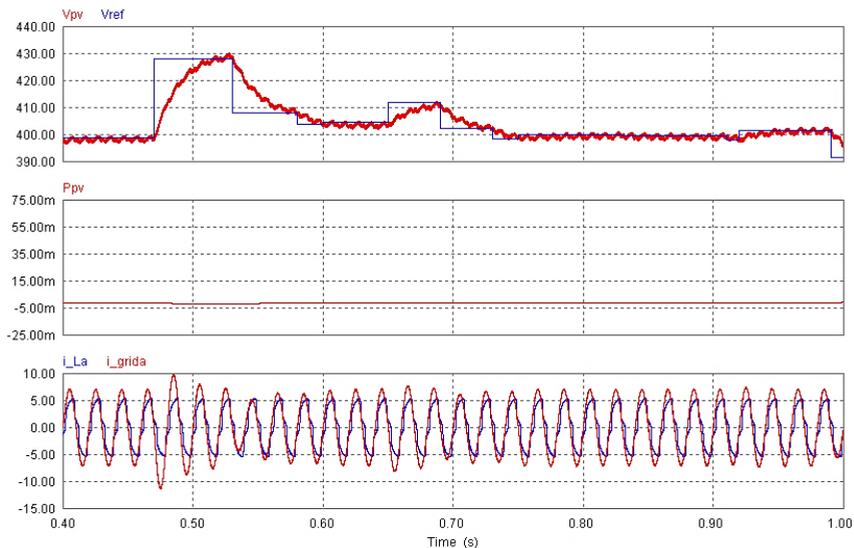


Gambar 4.21. Arus grid dan arus beban (fasa A)(atas); Arus grid tiga fasa (tengah); Tegangan grid (fasa A)(bawah)



Gambar 4.22. Tegangan referensi dan tegangan keluaran PV (atas); daya keluaran PV (tengah) pada kondisi tingkat radiasi 0.1kW/m²; Arus grid dan arus beban (bawah)

Ketika tingkat radiasi pada 0.1kW/m^2 (dibawah 0.3kW/m^2), tegangan DC-bus inverter ditahan pada tegangan minimum agar sistem tetap stabil. Gambar 4.22 memperlihatkan tegangan keluaran panel PV menjadi sekitar 370V. Panel PV membangkitkan daya yang kecil (sekitar 82W), tetapi bukan harga maksimumnya. Dari gambar 4.22, terlihat arus *grid* (gelombang sinusoidal) dan arus beban (gelombang terditorsi) untuk fasa A.

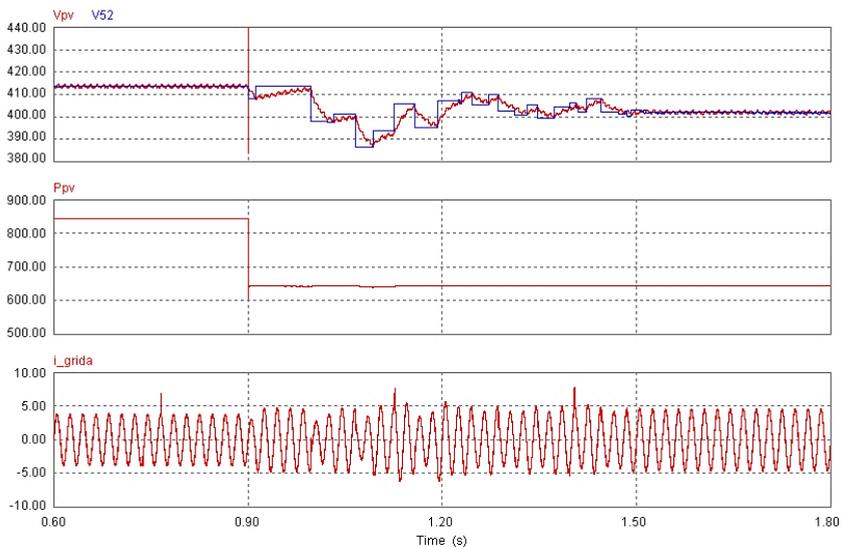


Gambar 4.23. Tegangan referensi dan tegangan keluaran PV (atas); daya keluaran PV (tengah) pada kondisi tingkat radiasi sama dengan nol; Arus grid dan arus beban (bawah)

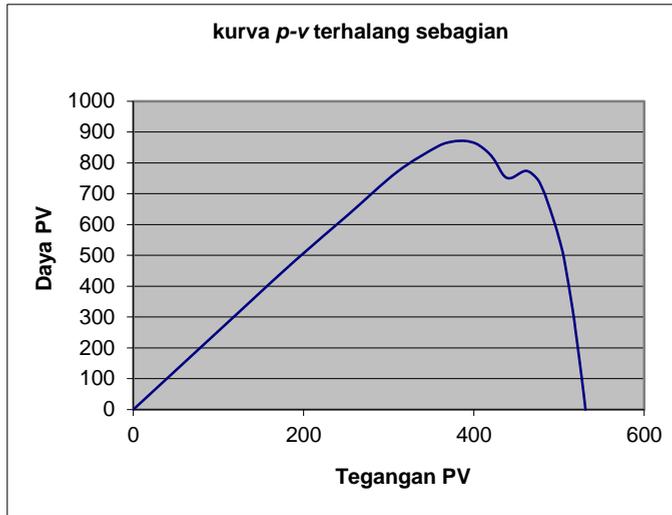
Untuk tingkat radiasi sama dengan nol, daya keluaran panel PV mendekati nilai nol, tetapi tegangan keluaran panel PV tidak sama dengan tegangan minimumnya (376V). Sukar bagi agen-agen untuk mencari daya maksimum global dari panel PV. Akibatnya, agen-agen

berusaha mengambil posisi sesuai dengan tegangan awal g_{best} . Gambar 4.23 menunjukkan hasil simulasi (tegangan dan daya keluaran PV serta arus beban (gelombang terdistorsi) dan arus $grid$ (gelombang sinusoidal)) untuk tingkat radiasi sama dengan nol.

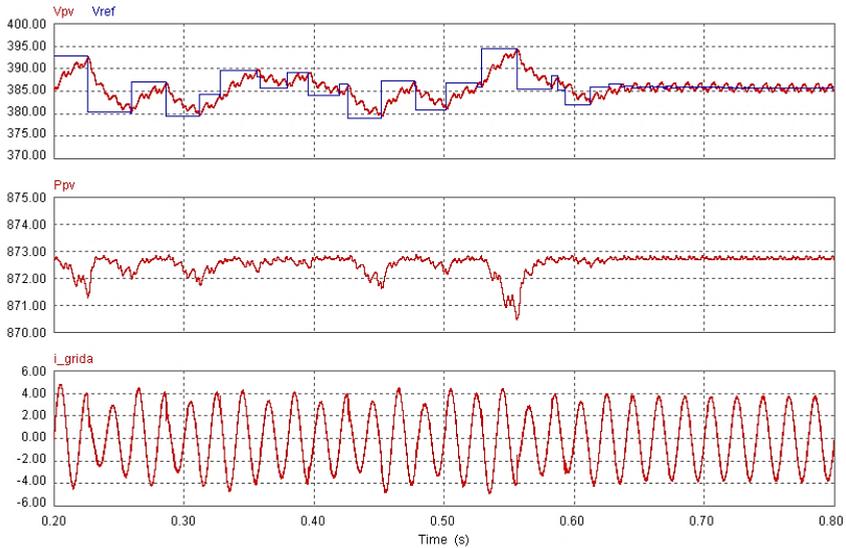
Gambar 4.24 menunjukkan tegangan dan daya keluaran panel PV serta amplitudo arus $grid$ yang naik ketika tingkat radiasi turun (0.7kW/m^2 ke 0.55kW/m^2). Rangkaian MPPT bereaksi secara cepat dan tepat dengan merubah tegangan agen-agen. Proses berlanjut dengan memperbaiki kecepatan gerak agen-agen dan mencari nilai g_{best} yang baru untuk MPP yang baru.



Gambar 4.24. Tegangan referensi dan tegangan keluaran PV (atas); daya keluaran panel PV (tengah); arus grid (fasa A)(bawah) ketika tingkat radiasi matahari berubah



Gambar 4.25. Kurva p-v pada kondisi panel PV tertutup sebagian



Gambar 4.26. Tegangan dan daya keluaran panel PV, dan arus grid ketika panel PV tertutup sebagian.

Gambar 4.25 dan 4.26 menggambarkan kinerja sistem ketika sebagian sinar matahari yang mengenai susunan panel PV terhalang oleh suatu benda. Kurva $p-v$ dalam kondisi ini digambarkan dalam gambar 4.25. Terlihat bahwa kurva $p-v$ mempunyai dua titik puncak, yang kiri lebih tinggi dari yang kanan. Hal ini berarti ada dua daya maksimum lokal. Dalam algoritma PSO, agen harus berusaha mendapatkan posisi (tegangan DC-bus) dari titik puncak tertinggi (yang kiri) yang disebut dengan g_{best} . Gambar 4.26 menunjukkan bahwa hasil akhir dari proses pencarian sangat tepat yaitu tegangan referensi yang dihasilkan rangkaian MPPT sekitar 385V. Dengan tegangan tersebut diperoleh titik maksimum global (sesungguhnya). Dengan adanya loop kendali tegangan, tegangan DC-bus CC-VSI, dan juga tegangan keluaran PV mencapai nilai yang sama dengan tegangan referensi yaitu sekitar 385V. Daya keluaran PV menjadi maksimum sekitar 873W.

Jadi dari kondisi *steady state* dan dinamis, terbukti bahwa algoritma PSO bekerja dengan sangat baik. CC-VSI yang didukung oleh rangkaian MPPT mempunyai kinerja yang sangat baik sebagai filter daya aktif dan transfer energi surya, termasuk bila sinar surya yang mengenai panel PV terhalang sebagian.

Referensi:

- [1] Castaner, L., and Silvestre, S., *Modelling Photovoltaic System using PSpice*, John Wiley & Sons, 2002.
- [2] Grandi, G., Casadei, D., and Rossi, C., *Direct Coupling of Power Active Filters with Photovoltaic Generation System with Improved MPPT Capability*, in IEEE Power Tech Conference, 2003. Bologna, Italy.
- [3] Wu, Tsai-Fu et.al., *PV Power Injection and Active Power Filtering with Amplitude-Clamping and Amplitude-Scaling*

- Algorithms*, IEEE Trans. on Industry Application, vol. 43, no. 3, p. 731-741, 2007.
- [4] Chen, Y., and Smedley, K.M., *A Cost-Effective Single-State Inverter with Maximum Power Point Tracking*, IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 19, no. 5, p. 1289-1294, 2004.
- [5] Wanzeller, M.G. et.al., *Current Control Loop for Tracking of Maximum Power Point Supplied for Photovoltaic Array*, IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, vol. 53, no. 4, p. 1304-1310, 2004.
- [6] Esram T., and Chapman P.L., *Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques*, IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 22, no. 2, p. 439-449, 2007.
- [7] Tumbelaka H.H., Miyatake, M., *Application of a CC-VSI for Active Filtering and Photovoltaic Energy Conversion with a 1-to-1 MPPT Controller*, Jurnal Teknik Elektro, UK Petra, vol. 8, no. 2, September 2008
- [8] Tumbelaka, H.H., Miyatake, M., *An Integrated System for Active Filter and Photovoltaic Energy Conversion*. Journal of Energy and Power Engineering, vol.4, no. 6, 2010.
- [9] Miyatake, M. et al., *Maximum Power Point Tracking Control Employing Fibonacci Search Algorithm for Photovoltaic Power generation System*, in International Conference of Power Electronics (ICPE'01), 2001, p:622-625.
- [10] https://id.wikipedia.org/wiki/Bilangan_Fibonacci (diakses tanggal 15 Mei 2017)
- [11] Tumbelaka, H.H., Miyatake, M., *Simple Integration of Three-phase Shunt Active Power Filter and Photovoltaic Generation System with Fibonacci-Search-Based MPPT*, in IEEE Symposium on Industrial Electronics & Applications (ISIEA) 2010. Penang, Malaysia, 2010

- [12] Kennedy, J., and Eberhart, R., *Particle Swarm Optimization*, Proc. of International Conference on Neural Networks, 1995, vol. IV, p:1942-1948, Perth.
- [13] Miyatake, M. et al., *A Novel Maximum Power Point Tracker Controlling Several Converters Connected to Photovoltaic Arrays with Particle Swarm Optimization Technique*, in EPE-PEMC, 2007, Aalborg.
- [14] Tumbelaka, H. H., Miyatake, M., *A Grid Current-controlled Inverter with Particle Swarm Optimization MPPT for PV Generators*. Proc. of World Academy of Science, Engineering and Technology (WASET), issue 67. Bali, 2010

5 KESIMPULAN

Penelitian ini mengamati CC-VSI sebagai filter daya aktif tipe paralel dan sekaligus pengatur aliran daya aktif dari panel surya. Sisi AC dari CC-VSI terhubung ke *grid*. Sisi DC terpasang panel PV sebagai sumber tegangan tak bebas. Strategi pengendaliannya yaitu keseimbangan daya aktif dengan mengendalikan arus *grid* secara langsung. Selain itu dibuat rangkaian MPPT untuk mendukung kerja panel PV. Kombinasi sistem ini dibuat modelnya dalam PSIM.

Ada empat algoritma MPPT untuk sistem ini yaitu algoritma *Look-up Table*, algoritma *Hill Climbing*, algoritma Pencarian Fibonacci, dan algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO). Keluaran rangkaian MPPT adalah tegangan DC yang menentukan nilai tegangan referensi DC-bus yang berarti juga nilai tegangan keluaran panel surya.

Sistem diuji dengan menggunakan simulasi komputer (*platform* PSIM). Hasil simulasi menunjukkan bahwa CC-VSI berhasil menjalankan fungsinya sebagai filter daya aktif dan pengendali aliran daya dari panel PV ke jaringan listrik. Hal ini berarti bahwa susunan panel PV dapat disambung ke DC-bus dari CC-VSI. Loop kendali arus, loop kendali tegangan, dan rangkaian MPPT dapat bekerja sama dengan baik. Dari hasil simulasi terlihat bahwa CC-VSI tidak hanya dapat mengatasi harmonisa dan daya reaktif pada jaringan listrik akibat beban tak linier, tetapi juga mengirimkan daya aktif dari panel surya ke jaringan listrik dan beban listrik yang terpasang. Daya maksimum berhasil diperoleh dari susunan panel PV dan dialirkan ke sistem karena pengendali MPPT bekerja dengan baik untuk melacak daya maksimum. Sistem bekerja dengan stabil dalam kondisi *steady state* dan dinamis. Beban listrik disuplai oleh jaringan listrik dan daya maksimum dari panel surya. Selain itu, pada kondisi tidak ada sinar

matahari, CC-VSI dapat bekerja hanya sebagai filter daya aktif tanpa mengganggu operasi dan stabilitas sistem.

Hasil simulasi juga menunjukkan bahwa sistem bekerja dengan baik untuk berbagai algoritma MPPT. Ada beberapa kelebihan dan kekurangan dari keempat macam algoritma MPPT. Algoritma yang paling sederhana adalah *Look-up Table*. Pada algoritma ini juga, kondisi *steady state* dapat dicapai dengan lebih cepat dibanding dengan yang lain. Tetapi untuk pembuatan model dibutuhkan data yang banyak dan akurat. Untuk mendapatkan titik puncak kurva $p-v$, ketergantungan pada model yang akurat sangat penting untuk algoritma ini. Sedangkan algoritma lain mempunyai mekanisme pencarian sendiri (*auto search*) untuk sampai pada titik puncak kurva $p-v$.

Diantara ketiga pelacak sendiri (*auto-tracker*), algoritma Hill Climbing adalah yang paling sederhana, sementara itu algoritma Pencarian Fibonacci dan PSO membutuhkan beberapa perhitungan. Hasil akhir dari algoritma Hill Climbing dan Pencarian Fibonacci beresilasi disekitar titik maksimum. Osilasi tersebut dapat menimbulkan sub-harmonisa pada sistem tenaga listrik. Untuk masalah sinar matahari yang terhalang sebagian (*partially-shaded*) yang mana terdapat beberapa titik maksimum lokal, hanya algoritma PSO yang dapat mencari titik maksimum sesungguhnya (global) secara benar.

INDEX

agen, 65
anti harmonisa, 2, 20, 23
APF tipe paralel, 21, 22, 31, 36
APF tipe seri, 21
arus referensi, 14, 24, 31
Beban tak linier, 17, 31
CC-VSI, 14, 28, 46
CSI (*Current Source Inverter*), 9
elektronika daya, 1, 7, 17
energi terbarukan, 2, 4
Fibonacci, 61, 75
filter daya aktif, 19, 27, 56
filter daya pasif, 19
Gain k , 35, 38, 39
grid-connected inverter, 8, 20, 51
harmonisa, 17
harmonisa arus, 22
harmonisa tegangan, 20, 28, 44
Hill Climbing, 74, 89
induktor seri, 27
inverter, 1, 2, 7, 13
kendali arus, 14
kendali tegangan, 14
keseimbangan daya aktif, 27, 34, 37
kompensasi daya secara langsung (IPC), 24
konverter, 1, 7
kurva $p-v$, 54
line-commutated inverter, 8
Look-up table, 59, 64, 70, 88
Loop kendali arus, 24, 26, 30
Loop kendali tegangan, 26, 34, 57
maximum power point tracking (MPPT), 21, 57

mengatasi masalah harmonisa, 19
metoda filter, 24
model sederhana sel surya (PV), 52
Model terintegrasi, 56
MPP global, 66
MPP lokal, 64
Multi-Level Inverter, 12
osilasi, 76, 89
Particle Swarm Optimization (PSO), 65, 88
pengendalian arus *grid* secara langsung, 26, 41
Proportional Integral (PI), 34, 52
pulse width modulation (PWM), 11
radiasi sinar matahari, 52
sensor arus, 23, 26, 29, 51
shaded module, 64
Standar IEEE 519, 22
sumber harmonisa, 18
tegangan DC-bus, 34, 59
tegangan referensi DC-bus, 58
teori $p-q$, 24
Thyristor, 7
total harmonic distortion (THD), 22
transfer energi surya, 51
transistor, 9
VC-VSI, 14
VSI (*Voltage Source Inverter*), 9
VSI tiga-fasa empat-kawat, 13, 26, 51