

**DIKTAT KULIAH**

**DINAMIKA DAN STABILITAS**

**SISTEM TENAGA LISTRIK**

**(KODE MK: TEU-9913)**



Oleh  
Dr. Ramadoni Syahputra, S.T., M.T.

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO**  
**FAKULTAS TEKNIK**  
**UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH YOGYAKARTA**  
**Maret 2016**

## KATA PENGANTAR

*Bismillaahirrahmaanirrahiim.*

Syukur alhamdulillah penulis panjatkan ke hadirat ALLAH SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan diktat kuliah “Dinamika dan Stabilitas Sistem Tenaga Listrik”. Dengan penulisan diktat ini diharapkan dapat membantu para pembaca khususnya mahasiswa jurusan Teknik Elektro untuk lebih mengenal dan memahami teori dan analisis tentang Dinamika dan Stabilitas Sistem Tenaga Listrik.

Penyelesaian diktat kuliah ini tidak lepas dari beberapa pihak yang telah banyak membantu. Oleh karena itu bersama ini penulis menyampaikan terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada:

1. Prof. Dr. Bambang Cipto, M.A., sebagai Rektor Universitas Muhammadiyah Yogyakarta,
2. Jazaul Ikhsan, S.T., M.T., Ph.D., sebagai Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta,
3. Ir. Agus Jamal, M.Eng., sebagai Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta,
4. Sejawat Dosen dan Karyawan Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, yang telah banyak membimbing dan membantu penulis dalam melaksanakan tugas yang diberikan kepada penulis,
5. Isteriku tercinta Dr. Indah Soesanti, S.T., M.T., yang telah banyak membantu dan memberikan masukan yang sangat berguna dalam penyelesaian diktat ini,
6. Ibunda dan ayahanda (alm) yang selalu mendoakan penulis,
7. Seluruh Dosen dan Karyawan Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, dan
8. Semua pihak yang telah membantu.

Penulis menyadari bahwa diktat kuliah ini masih jauh dari sempurna. Untuk itu segala kritik dan saran yang bersifat membangun akan penulis terima dengan lapang dada.

Akhirnya, semoga diktat kuliah ini dapat bermanfaat dalam proses belajar-mengajar khususnya di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.

Yogyakarta, Maret 2016  
Penulis

## DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	ii
DAFTAR ISI	iii
BAB I LATAR BELAKANG	1
1.1 Pendahuluan	1
1.2 Energi Listrik	1
1.3 Pembangkit Listrik Berbahan Bakar Fosil	5
1.4 Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir	7
1.5 Pembangkit Listrik Tenaga Air	8
1.6 Transmisi Dan Distribusi Daya Listrik	9
BAB II PRINSIP-PRINSIP DASAR	13
2.1 Pendahuluan	13
2.2 Representasi Fasor	13
2.3 Catu Daya Kompleks Ke Suatu Titik	14
2.3. Konservasi Daya Kompleks	19
2.4. Tiga Phase Seimbang	21
2.5. Analisis Per-Phase	26
2.7. Daya Tiga Phase Seimbang	27
BAB III PARAMETER-PARAMETER SALURAN TRANSMISI	29
3.0. Pendahuluan	29
3.1 Review Medan Magnetik	30
3.2 Fluks Lingkup Kawat Panjang Takberhingga	32
3.3 Fluks Lingkup Kawat Konduktor Banyak	36
3.4 Konduktor Berkas ( <i>Bundled Conductor</i> )	41
3.5 Transposisi	43
3.6 Impedansi Saluran Tiga Phase Dengan Menyertakan Pembumian	46
3.7 Review Medan Listrik	48
3.8 Kapasitansi Saluran	49

3.9 Penentuan Parameter Saluran Transmisi Menggunakan Tabel	51
3.10 Nilai-Nilai Parameter Saluran Transmisi	53
<b>BAB IV PEMODELAN SALURAN TRANSMISI</b>	<b>55</b>
4.1 Pendahuluan	55
4.2 Derivasi Relasi Tegangan V Dan Arus I	55
4.3 Gelombang Pada Saluran Transmisi	58
4.3 Matriks Transmisi	60
4.4 Rangkaian Ekuivalen Tergumpal	61
4.5 Model Yang Disederhanakan	64
4.6 Transmisi Daya Kompleks	65
4.7 Transmisi Daya Kompleks (Saluran Radial Jarak Pendek)	70
4.8 Transmisi Daya Kompleks (Saluran Jarak Menengah atau Panjang)	71
4.9 Kapasitas Daya Saluran Transmisi	72
<b>BAB V PEMODELAN TRANSFORMATOR DAN SISTEM PER UNIT</b>	<b>74</b>
5.1 Pendahuluan	74
5.2 Model Transformator Phase Tunggal	76
5.3 Hubungan Transformator Tiga-Phase	79
5.4. Analisis Per-Phase	82
5.5. Normalisasi Per Unit	85
<b>BAB VI PEMODELAN GENERATOR I</b>	<b>87</b>
6.1 Pendahuluan	87
6.2 Deskripsi Mesin Klasik	87
6.3 Tegangan Generator	89
6.4 Tegangan Hubung Terbuka ( <i>Open Circuit Voltage</i> )	90
6.4 Reaksi Jangkar ( <i>Armature Reaction</i> )	92
6.5 Tegangan Terminal	96
6.6 Daya Yang Dikirimkan Oleh Generator	97
6.7 Sinkronisasi Generator Ke Infinite Bus	99
6.8 Kondensor Sinkron	101
6.10 Eksitasi Sinkron Dalam Pengendalian Daya Reaktif	101

BAB VII PEMODELAN GENERATOR II	103
7.0 Pendahuluan	103
7.2 Aplikasi Pada Mesin Sinkron	105
7.3 Transformasi Park	107
7.4 Persamaan Tegangan Park's	108
7.5 Persamaan Mekanik Park's	109
7.6 Model Rangkaian	110
7.7 Keluaran Daya Seketika	112
7.8 Aplikasi	113
7.9 Operasi Sinkron	113
7.10 Model Steady-State	116
7.11 Model Dinamik Sederhana	117
7.12 Generator Terhubung Ke Infinite Bus	118
BAB VIII KONTROL TEGANGAN GENERATOR	120
8.0. Pendahuluan	120
8.1. Diagram Blok Sistem Penguat ( <i>Exciter System Block Diagram</i> )	122
8.3 Model Generator	125
8.3 Kestabilan System Excitation (Stability Of Excitation System)	126
8.4. Regulasi Tegangan (Voltage Regulation)	126
8.5. Generator Yang Dihubungkan Ke Infinite Bus	127
BAB IX MATRIKS JARINGAN	138
9.0. Pendahuluan	138
9.1. Matriks Admitansi Bus	138
9.2. Solusi Jaringan	140
9.3. Reduksi Jaringan (Reduksi Kron)	144
9.4. Struktur Dan Manipulasi $Y_{bus}$	144
9.5. Matriks Impedansi Bus	145
9.6. Inversi Elemen Untuk Menentukan Kolom $Z_{bus}$	148
BAB X ANALISIS ALIRAN DAYA	149
10.0. Pendahuluan	149

10.1. Persamaan Aliran Daya	150
10.2. Permasalahan Aliran Daya	152
10.3. Solusi Menggunakan Iterasi Gauss	153
10.4. Skema Iterasi Umum	156
10.5. Iterasi Newton-Raphson	158
10.6. Aplikasi Pada Persamaan Aliran Daya	159
10.7. Aliran Daya Tergandeng	161
10.8. Implikasi Kontrol	162
10.9. Regulasi Transformator Dalam Analisis Aliran Daya	163
10.10. Solusi Aliran Daya Untuk Sistem Tenaga Listrik Besar	163
10.10.1. Kebutuhan Penyimpanan	163
10.10.2. Kebutuhan Komputasional	164
 DAFTAR PUSTAKA	 166

# **BAB I**

## **LATAR BELAKANG**

### **1.1 PENDAHULUAN**

Salah satu cara paling ekonomis, mudah dan aman untuk mengirimkan energi adalah melalui bentuk energi listrik. Energi listrik dapat secara kontinu dikirimkan dari satu tempat ke tempat lain yang jaraknya berjauhan dalam suatu sistem tenaga listrik. Sistem tenaga listrik merupakan kumpulan dari komponen-komponen atau alat-alat listrik seperti generator, transformator, saluran transmisi, saluran distribusi, dan beban, yang dihubung-hubungkan dan membentuk suatu sistem.

Industri tenaga listrik telah dimulai sejak tahun 1882 ketika pusat pembangkit daya listrik pertama yang bernama Pearl Street Electric Station mulai beroperasi di kota New York, Amerika Serikat. Selanjutnya industri tenaga listrik sangat pesat perkembangannya, dan stasiun-stasiun pembangkitan dan jaringan transmisi dan distribusi telah bermunculan di berbagai negara.

Energi listrik merupakan energi yang sangat bermanfaat. Tidak dapat dipungkiri lagi bahwa manusia dewasa ini sudah demikian besar tingkat ketergantungannya terhadap energi listrik. Sehingga energi listrik bagi kebutuhan hidup manusia dewasa ini sudah hampir "setara" dengan oksigen. Bahkan ukuran kemajuan suatu negara dapat diukur dari tingkat konsumsi energi listriknya. Sebagai contoh Amerika Serikat yang merupakan negara sebagai negara yang sangat maju pada tahun 2000 mempunyai kapasitas terpasang pembangkit listrik total sekitar 1200 GW atau  $1,2 \times 10^{12}$  Watt. Dapat dibandingkan dengan negara kita tercinta,

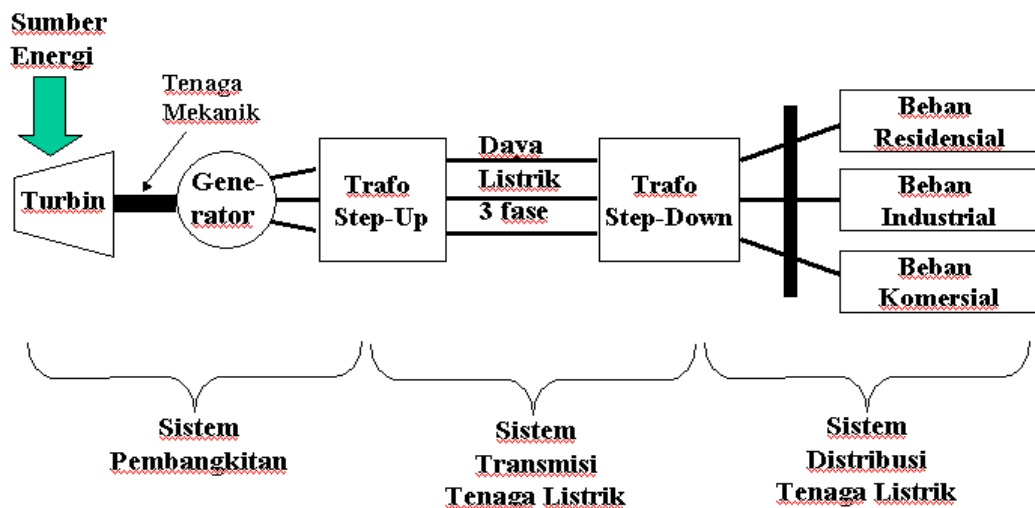
Indonesia, yang masih merupakan negara berkembang pada akhir tahun 2004 untuk sistem Jawa-Bali mempunyai kapasitas terpasang pembangkit listrik sekitar 20 GW. Konsumen listrik di Indonesia sebagian besar berada di Jawa-Bali, sehingga sebagian besar pembangkit listriknya terpusat di pulau Jawa dan Bali.

## **1.2 KOMPONEN SISTEM TENAGA LISTRIK**

Secara umum definisi sistem tenaga listrik meliputi sistem pembangkitan, sistem transmisi, dan sistem distribusi, yang secara garis besar ditunjukkan pada gambar 1.1. Belakangan ini sistem distribusi jika dilihat dari skala nasional, diperkirakan sama dengan biaya investasi fasilitas pembangkitan. Sistem distribusi bersama-sama dengan sistem pembangkitan berdasarkan pengalaman biasanya menelan biaya investasi hingga 80% dari total investasi yang dikeluarkan untuk sistem tenaga listrik.

Siklus aliran energi listrik pada sistem tenaga listrik dapat dijelaskan sebagai berikut. Pada pusat pembangkit, sumber daya energi primer seperti bahan bakar fosil (minyak, gas alam, dan batubara), hidro, panas bumi, dan nuklir diubah menjadi energi listrik. Generator sinkron mengubah energi mekanis yang dihasilkan pada poros turbin menjadi energi listrik tiga fasa. Melalui transformator *step-up*, energi listrik ini kemudian dikirimkan melalui saluran transmisi bertegangan tinggi menuju pusat-pusat beban.





Gambar 1.1. Komponen utama sistem tenaga listrik.

Peningkatan tegangan dimaksudkan untuk mengurangi jumlah arus yang mengalir pada saluran transmisi. Dengan demikian saluran transmisi bertegangan tinggi akan membawa aliran arus yang rendah dan berarti mengurangi rugi panas (*heat loss*)  $I^2R$  yang menyertainya. Ketika saluran transmisi mencapai pusat beban, tegangan tersebut kembali diturunkan menjadi tegangan menengah melalui transformator *step-down*.

Di pusat-pusat beban yang terhubung dengan saluran distribusi, energi listrik ini diubah menjadi bentuk-bentuk energi terpakai lainnya seperti energi mekanis (motor), penerangan, pemanas, pendingin, dan sebagainya.

### Latihan:

1. Gambarkan dan jelaskan komponen pokok sistem tenaga listrik serta jelaskan fungsinya masing-masing.
2. Jelaskan arti penting energi listrik bagi umat manusia dewasa ini.

3. Kemajuan suatu negara dapat diukur dari tingkat konsumsi energi listriknya. Analisislah apakah pernyataan tersebut dapat diterima. Buktikan dengan data-data tentang konsumsi energi listrik berbagai negara, baik negara maju maupun negara berkembang. Data-data dapat didapatkan dari berbagai sumber misalnya jurnal ilmiah, majalah, atau internet.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kundur, P. (1993), "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, Inc, New York.
- [2] Machowsky, B., Burnby, (1997), "Power system Dynamic and Stability", John Willey and Sons, New York.
- [3] Robandi, I. (2006), "Desain Sistem Tenaga Modern", Penerbit ANDI, Yogyakarta.
- [4] Stevention, W.D. (1982), "Element of Power system Analysis", MCGraw-Hill International Book Company, New York.
- [5] Anderson, Fouad, (2003), "Power System Control and Stability", IEEE Press.
- [6] Syahputra, R., Soesanti, I. (2016). DFIGN Control Scheme of Wind Power Using ANFIS Method in Electrical Power Grid System. International Journal of Applied Engineering Research (IJAER), 11(7), pp. 5256-5262.
- [7] Soesanti, I., Syahputra, R. (2016). Batik Production Process Optimization Using Particle Swarm Optimization Method. Journal of Theoretical and Applied Information Technology (JATIT), 86(2), pp. 272-278.
- [8] Syahputra, R., Soesanti, I. (2016). Design of Automatic Electric Batik Stove for Batik Industry. Journal of Theoretical and Applied Information Technology (JATIT), 87(1), pp. 167-175.
- [9] Syahputra, R. (2016). Application of Neuro-Fuzzy Method for Prediction of Vehicle Fuel Consumption. Journal of Theoretical and Applied Information Technology (JATIT), 86(1), pp. 138-149.
- [10] Jamal, A., Suropto, S., Syahputra, R. (2016). Performance Evaluation of Wind Turbine with Doubly-Fed Induction Generator. International Journal of Applied Engineering Research (IJAER), 11(7), pp. 4999-5004.
- [11] Syahputra, R., Robandi, I., Ashari, M. (2015). Performance Improvement of Radial Distribution Network with Distributed Generation Integration Using Extended Particle Swarm Optimization Algorithm. International Review of Electrical Engineering (IREE), 10(2). pp. 293-304.

- [12] Syahputra, R., Robandi, I., Ashari, M. (2015). Reconfiguration of Distribution Network with DER Integration Using PSO Algorithm. *TELKOMNIKA*, 13(3). pp. 759-766.
- [13] Syahputra, R., Robandi, I., Ashari, M. (2015). PSO Based Multi-objective Optimization for Reconfiguration of Radial Distribution Network. *International Journal of Applied Engineering Research (IJAER)*, 10(6), pp. 14573-14586.
- [14] Syahputra, R. (2015). Simulasi Pengendalian Temperatur Pada Heat Exchanger Menggunakan Teknik Neuro-Fuzzy Adaptif. *Jurnal Teknologi*, 8(2), pp. 161-168.
- [15] Syahputra, R. (2015). Characteristic Test of Current Transformer Based EMTP Software. *Jurnal Teknik Elektro*, 1(1), pp. 11-15.
- [16] Syahputra, R., (2012), "Distributed Generation: State of the Arts dalam Penyediaan Energi Listrik", LP3M UMY, Yogyakarta, 2012.
- [17] Jamal, A., Suropto, S., Syahputra, R. (2015). Multi-Band Power System Stabilizer Model for Power Flow Optimization in Order to Improve Power System Stability. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 80(1), pp. 116-123.
- [18] Syahputra, R., Robandi, I., Ashari, M. (2014). Optimization of Distribution Network Configuration with Integration of Distributed Energy Resources Using Extended Fuzzy Multi-objective Method. *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, 9(3), pp. 629-639.
- [19] Syahputra, R., Robandi, I., Ashari, M. (2014). Performance Analysis of Wind Turbine as a Distributed Generation Unit in Distribution System. *International Journal of Computer Science & Information Technology (IJCSIT)*, Vol. 6, No. 3, pp. 39-56.
- [20] Syahputra, R., Robandi, I., Ashari, M., (2014), "Distribution Network Efficiency Improvement Based on Fuzzy Multi-objective Method". *IPTEK Journal of Proceedings Series*. 2014; 1(1): pp. 224-229.
- [21] Jamal, A., Syahputra, R. (2014). Power Flow Control of Power Systems Using UPFC Based on Adaptive Neuro Fuzzy. *IPTEK Journal of Proceedings Series*. 2014; 1(1): pp. 218-223.
- [22] Syahputra, R., (2013), "A Neuro-Fuzzy Approach For the Fault Location Estimation of Unsynchronized Two-Terminal Transmission Lines", *International Journal of Computer Science & Information Technology (IJCSIT)*, Vol. 5, No. 1, pp. 23-37.
- [23] Jamal, A., Syahputra, R. (2013). UPFC Based on Adaptive Neuro-Fuzzy for Power Flow Control of Multimachine Power Systems. *International Journal of Engineering Science Invention (IJESI)*, 2(10), pp. 05-14.
- [24] Syahputra, R., (2012), "Fuzzy Multi-Objective Approach for the Improvement of Distribution Network Efficiency by Considering DG", *International Journal of Computer Science & Information Technology (IJCSIT)*, Vol. 4, No. 2, pp. 57-68.
- [25] Jamal, A., Syahputra, R. (2012), "Adaptive Neuro-Fuzzy Approach for the Power System Stabilizer Model in Multi-machine Power System", *International Journal of Electrical & Computer Sciences (IJECS)*, Vol. 12, No. 2, 2012.
- [26] Jamal, A., Syahputra, R. (2011), "Model Power System Stabilizer Berbasis Neuro-Fuzzy Adaptif", *Semesta Teknika*, Vol. 14, No. 2, 2011, pp. 139-149.
- [27] Utomo, A.T., Syahputra, R., Iswanto, (2011), "Implementasi Mikrokontroler Sebagai Pengukur Suhu Delapan Ruangan", *Jurnal Teknologi*, 4(2).

- [28] Syahputra, R., (2010), "Aplikasi Deteksi Tepi Citra Termografi untuk Pendeteksian Keretakan Permukaan Material", Forum Teknik, Vol. 33, 2010.
- [29] Syahputra, R., Soesanti, I. (2015). "Control of Synchronous Generator in Wind Power Systems Using Neuro-Fuzzy Approach", Proceeding of International Conference on Vocational Education and Electrical Engineering (ICVEE) 2015, UNESA Surabaya, pp. 187-193.
- [30] Syahputra, R., Robandi, I., Ashari, M. (2014). "Optimal Distribution Network Reconfiguration with Penetration of Distributed Energy Resources", Proceeding of 2014 1st International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE) 2014, UNDIP Semarang, pp. 388 - 393.
- [31] Soedibyo, Ashari, M., Syahputra, R. (2014), Power loss reduction strategy of distribution network with distributed generator integration. 1st International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE) 2014, UNDIP Semarang, pp. 404 – 408.
- [32] Syahputra, R., Robandi, I., Ashari, M., (2013), "Distribution Network Efficiency Improvement Based on Fuzzy Multi-objective Method". International Seminar on Applied Technology, Science and Arts (APTECS). 2013; pp. 224-229.
- [33] Riyadi, S., Azra, R.A., Syahputra, R., Hariadi, T.K., (2014), "Deteksi Retak Permukaan Jalan Raya Berbasis Pengolahan Citra dengan Menggunakan Kombinasi Teknik Thresholding, Median Filter dan Morphological Closing", Simposium Nasional Teknologi Terapan (SNTT)2 2014, UMS Surakarta, pp. 46-53.
- [34] Syahputra, R., Robandi, I., Ashari, M., (2012), "Reconfiguration of Distribution Network with DG Using Fuzzy Multi-objective Method", International Conference on Innovation, Management and Technology Research (ICIMTR), May 21-22, 2012, Melacca, Malaysia.
- [35] Jamal, A., Syahputra, R., (2011), "Design of Power System Stabilizer Based on Adaptive Neuro-Fuzzy Method". International Seminar on Applied Technology, Science and Arts (APTECS). 2011; pp. 14-21.
- [36] Syahputra, R. (2010). Fault Distance Estimation of Two-Terminal Transmission Lines. Proceedings of International Seminar on Applied Technology, Science, and Arts (2nd APTECS), Surabaya, 21-22 Dec. 2010, pp. 419-423.
- [37] Syahputra, R., (2015), "Teknologi dan Aplikasi Elektromagnetik", LP3M UMY, Yogyakarta, 2016.
- [38] Syahputra, R., (2014), "Estimasi Lokasi Gangguan Hubung Singkat pada Saluran Transmisi Tenaga Listrik", Jurnal Ilmiah Semesta Teknik Vol. 17, No. 2, pp. 106-115, Nov 2014.
- [39] Syahputra, R., Robandi, I., Ashari, M., (2011), "Modeling and Simulation of Wind Energy Conversion System in Distributed Generation Units". International Seminar on Applied Technology, Science and Arts (APTECS). 2011; pp. 290-296.
- [40] Syahputra, R., Robandi, I., Ashari, M., (2011), "Control of Doubly-Fed Induction Generator in Distributed Generation Units Using Adaptive Neuro-Fuzzy Approach". International Seminar on Applied Technology, Science and Arts (APTECS). 2011; pp. 493-501.
- [41] Syahputra, R., (2016), "Transmisi dan Distribusi Tenaga Listrik", LP3M UMY, Yogyakarta, 2016.
- [42] Syahputra, R., (2015), "Teknologi dan Aplikasi Elektromagnetik", LP3M UMY, Yogyakarta, 2016.

- [43] Jamal, A., Syahputra, R. (2016). Heat Exchanger Control Based on Artificial Intelligence Approach. International Journal of Applied Engineering Research (IJAER), 11(16), pp. 9063-9069.
- [44] Syahputra, R., Soesanti, I. (2015). Power System Stabilizer model based on Fuzzy-PSO for improving power system stability. 2015 International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture, and Industrial Automation (ICAMIMIA), Surabaya, 15-17 Oct. 2015 pp. 121 - 126.