

SKRIPSI

**PENGARUH PEMASANGAN KOMPENSATOR
TERHADAP TRANSMISI 500 kV PADA
SISTEM KETENAGALISTRIKAN SULBAGSEL**

Disusun dan diajukan oleh:

ANDI FAJRUL AKBAR

D041 17 1009



**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2023**



LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

PENGARUH PEMASANGAN KOMPENSATOR TERHADAP TRANSMISI 500 kV PADA SISTEM KETENAGALISTRIKAN SULBAGSEL

Disusun dan diajukan oleh

Andi Fajrul Akbar

D041171009

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada Tanggal 2 Februari 2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,

Dr. Ir. Ikhlas Kitta, S.T., M.T.
NIP 197609142008011006

Ir. Tajuddin Waris, M.T.
NIP 196504241992031003

Ketua Program Studi,

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



PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Andi Fajrul Akbar

NIM : D041171009

Program Studi : Teknik Elektro

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

PENGARUH PEMASANGAN KOMPENSATOR TERHADAP TRANSMISI 500 kV PADA SISTEM KETENAGALISTRIKAN SULBAGSEL

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 2 Februari 2024

Yang Menyatakan



Andi Fajrul Akbar



ABSTRAK

ANDI FAJRUL AKBAR. *Pengaruh Pemasangan Kompensator Terhadap Transmisi 500 kV pada Sistem Ketenagalistrikan Sulbagsel* (dibimbing oleh Ikhlas Kitta dan Tajuddin Waris)

Energi listrik ditransmisikan dengan mudah dan memiliki efisiensi yang tinggi. Pengiriman energi listrik berasal dari pembangkit energi menuju beban (konsumen). Dalam pengoperasiannya, sistem kelistrikan tidak lepas dari gangguan yang mempengaruhi aliran daya pada sistem. Pada Tugas Akhir ini dibahas mengenai dampak yang ditimbulkan ketika terjadi gangguan pada sistem kelistrikan Sulbagsel dengan penambahan transmisi 500 kV. Gangguan disimulasikan dengan kontingensi saluran N-1 dimana dilakukan pelepasan sebuah saluran transmisi dari sistem kelistrikan. Simulasi yang dilakukan menggunakan bantuan aplikasi Power Factory DigSilent 15.1 untuk pemodelan sistem dalam bentuk *single line diagram* dan analisis kontingensinya. Kontingensi yang dilakukan menyebabkan gangguan berupa jatuh tegangan pada beberapa bus di sistem kelistrikan Sulbagsel sehingga dibutuhkan kompensator untuk perbaikan faktor daya agar tidak terjadi jatuh tegangan. Pada simulasi yang dilakukan dengan melepas saluran transmisi yang menghubungkan bus Bantaeng Switch 500 kV dengan bus Punagaya 500 kV mengakibatkan 7 bus mengalami jatuh tegangan. Setelah pemasangan kapasitor pada bus sebesar 80,974 MVar di bus Bantaeng Smelter maka didapatkan sistem menjadi normal dan tidak ada bus yang mengalami jatuh tegangan.

Kata Kunci: Sistem kelistrikan Sulbagsel, kontingensi saluran N-1, jatuh tegangan, faktor daya, kompensasi



ABSTRACT

ANDI FAJRUL AKBAR. *The Impact of Compensator Installation on 500 kV Transmission in Sulbagsel Electrical Power System* (supervised by Ikhlas Kitta and Tajuddin Waris)

Electrical energy can be easily transmitted and highly efficient. The transmission of electrical energy comes from power generating stations to loads (consumers) within an electrical power system. In the operational context, the electrical power system is unavoidably subject to faults that can affect the power flow within the system. This Final Project addresses an exploration of the repercussions resulting from the assumption of a fault occurring within the Southern Sulawesi (Sulbagsel) electrical power system, in conjunction with the addition of a 500 kV transmission. The simulated fault involves the N-1 line contingency, wherein a transmission line is disconnected from the electrical power system. The simulation, facilitated by the Power Factory DigSilent 15.1 application, encompasses the modeling of the system in the form of a single-line diagram and the analysis of the contingencies. The contingencies results in fault in the form of undervoltage experienced by several buses in the Sulbagsel electrical power system, necessitating compensation measures to improve the power factor so as to surmount the undervoltage condition. The simulation conducted, which entails the disconnection of the transmission line linking the Bantaeng Switch 500 kV bus and the Punagaya 500 kV bus, leads to 7 buses experiencing undervoltage. Subsequently, upon the installation of capacitors with ratings of 80,974 MVAR at the Bantaeng Smelter bus, the system is restored to a normal state, with no buses encountering undervoltage.

Keywords: Sulbagsel power system, N-1 contingency, undervoltage, power factor, compensation



KATA PENGANTAR

Segala puji atas kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul : “Pengaruh Pemasangan Kompensator Terhadap Transmisi 500 kV pada Sistem Ketenagalistrikan Sulbagsel.”

Tujuan penulisan skripsi ini untuk memenuhi sebagai syarat menyelesaikan studi bagi mahasiswa program S1 di program Studi Teknik Elektro Universitas Hasanuddin.

Penyelesaian skripsi ini tidak terlepas dari bantuan banyak pihak, sehingga pada kesempatan ini dengan segala kerendahan hati dan penuh rasa hormat penulis mengucapkan banyak terima kasih bagi semua pihak yang telah memberikan bantuan moril maupun materil dalam penyusunan skripsi ini hingga selesai. Maka, dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih yang tulus kepada:

1. Kedua orang tua tercinta, Bapak Muh. Sunusi dan Ibu Andi Rahmawati serta kakak Andi Mutakabbir, serta Andi Irmah Rahmayani yang selalu memberikan dukungan baik moril maupun materil, memotivasi, menyemangati dan mendo'akan penulis sehingga proses pengerjaan tugas akhir dapat terlaksana dengan lancar.
2. Ibu Dr. Eng. Ir. Dewiani, MT, selaku Ketua Departemen Teknik Elektro.
3. Bapak Dr. Ir. Ikhlas Kitta, S.T., M.T. dan Bapak Ir. Tajuddin Waris, M.T. selaku dosen pembimbing skripsi saya yang telah memberikan bimbingan dan kritik hingga dapat terselesaikannya skripsi ini.
4. Bapak Dr. Indar Chaerah Gunadin, S.T., M.T. dan Ibu Dr. Ir. Hj. Sri Mawar Said, M.T. selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik dan saran yang sangat berguna dalam penyusunan skripsi.



Bapak/Ibu dosen dan staff di lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin khususnya program Studi Teknik Elektro yang telah banyak membantu saya selama menjalani masa studi.

6. Kepada semua pihak yang terlibat dan tidak dapat saya sebut satu persatu, terima kasih yang tak terhingga atas semua dukungan dan bantuannya.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini jauh dari sempurna, oleh karena itu penulis sangat mengharapkan adanya koreksi dan masukan yang bertujuan untuk memperkaya kajian Tugas Akhir ini. Akhir kata semoga skripsi ini dapat berguna dan bermanfaat bagi kita semua, amin.

Makassar, Juli 2023

Penulis



DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT.....	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR LAMPIRAN.....	xi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan Penelitian.....	3
1.4. Batasan Masalah	3
1.5. Manfaat Penelitian.....	3
1.6. Sistematikan Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1. Sistem Tenaga Listrik	5
2.2. Sistem Daya Listrik	5
2.2.1. Daya aktif	5
2.2.2. Daya Reaktif.....	6
2.2.3. Daya Nyata.....	6
2.2.4. Faktor Daya	7
2.3. Saluran Transmisi	7
2.4. Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi.....	8
2.5. Beban Listrik	9
2.6. Kestabilan Tegangan	10
2.7. Kapasitor Bank	11
BAB III METODE PENELITIAN.....	13
3.1. Judul Penelitian.....	13
3.2. Lokasi Penelitian	13
3.3. Waktu Penelitian.....	13
3.4. Prosedur Penelitian	13
3.5. Objek Penelitian	13
3.6. Metode Penelitian	14
3.7. Instrumen Penelitian.....	15



BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN.....	16
4.1. Perencanaan Simulasi	16
4.2. Sistem Interkoneksi Sulbagsel.....	17
4.3. Data Penelitian.....	20
4.4. Simulasi Aliran Daya Sistem Sulbagsel saat Keadaan Normal.....	28
4.5. Simulasi Kontingensi.....	33
4.5.1. Kontingensi Saluran Transmisi Bantaeng Switch-Punagaya	35
4.5.2. Kontingensi Saluran Transmisi Punagaya-Daya Baru	36
4.5.3. Kontingensi Saluran Transmisi Daya Baru-Sidrap	36
4.5.4. Kontingensi Saluran Transmisi Sidrap-Enrekang.....	38
4.5.5. Kontingensi Saluran Transmisi Enrekang-Latuppa	38
4.5.6. Kontingensi Saluran Transmisi Wotu-Bungku	38
4.5.7. Kontingensi Saluran Transmisi Bungku-Andowia	39
4.5.8. Kontingensi Saluran Transmisi Andowia-Kendari	41
4.6. Analisis Kontingensi dan Kompensasi Daya Reaktif.....	42
4.6.1. Kompensasi Saluran Transmisi Bantaeng Switch-Punagaya.....	42
4.6.2. Kompensasi Saluran Transmisi Daya Baru-Sidrap.....	43
4.6.3. Kompensasi Saluran Transmisi Wotu-Bungku	44
4.6.4. Kompensasi Saluran Transmisi Bungku-Andowia	45
4.6.5. Kompensasi Saluran Transmisi Andowia-Kendari	47
BAB V PENUTUP.....	48
5.1. Kesimpulan.....	48
5.2. Saran	48
DAFTAR PUSTAKA	49



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Sistem tenaga listrik	5
Gambar 2 Segitiga Daya	7
Gambar 3 Diagram alir penelitian.....	15
Gambar 4 Bus 500 kV pada single line diagram sistem interkoneksi Sulbagsel	18
Gambar 5 Single line diagram sistem interkoneksi Sulbagsel dengan transmisi 500 kV pada aplikasi DigSilent.....	19
Gambar 6 Profil Tegangan bus 70 kV Sistem Sulbagsel saat kondisi normal pada beban puncak siang dan malam.....	31
Gambar 7 Profil Tegangan bus 150 kV Sistem Sulbagsel saat kondisi normal pada beban puncak siang dan malam.....	31
Gambar 8 Profil Tegangan bus 275 kV Sistem Sulbagsel saat kondisi normal pada beban puncak siang dan malam.....	32
Gambar 9 Tegangan bus 500 kV Sistem Sulbagsel saat kondisi normal pada beban puncak siang dan malam.....	33
Gambar 10 Perbandingan tegangan saat kontingensi saluran Bantaeng Switch-Punagaya dan setelah kompensasi	43
Gambar 11 Perbandingan tegangan saat kontingensi saluran Daya Baru- Sidrap dan setelah kompensasi.....	44
Gambar 12 Perbandingan tegangan saat kontingensi saluran Wotu-Bungku dan setelah kompensasi	45
Gambar 13 Perbandingan tegangan saat kontingensi saluran Bungku- Andowia dan setelah kompensasi	46
Gambar 14 Perbandingan tegangan saat kontingensi saluran Andowia- Kendari dan setelah kompensasi	47



DAFTAR TABEL

Tabel 1 Perencanaan simulasi	16
Tabel 2 Daftar penambahan saluran transmisi 500 kV berdasarkan RUPTL PT. PLN 2019-2028	20
Tabel 3 Data kapasitas pembangkit Sulbagsel	21
Tabel 4 Data saluran transmisi 70 kV	22
Tabel 5 Data saluran transmisi 150 kV	23
Tabel 6 Data Saluran Transmisi 275 kV	27
Tabel 7 Data Saluran Transmisi 500 kV	28
Tabel 8 Hasil simulasi aliran daya kondisi normal	29
Tabel 9 Daftar saluran transmisi 500 kV yang dikontingensi	34
Tabel 10 Dampak Kontingensi Saluran 500 kV Bantaeng Switch-Punagaya	35
Tabel 11 Dampak Kontingensi Saluran 500 kV Daya Baru-Sidrap	37
Tabel 12 Dampak Kontingensi Saluran 500 kV Wotu-Bunku.....	39
Tabel 13 Dampak Kontingensi Saluran 500 kV Bungku-Andowia.....	39
Tabel 14 Dampak Kontingensi Saluran 500 kV Andowia-Kendari.....	41



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Data Transformator Generator.....	51
Lampiran 2 Data Transformator Interbus (IBT)	52
Lampiran 3 Data Transformator Daya	53
Lampiran 4 Data Beban	57
Lampiran 5 Data profil tegangan bus Sistem Sulbagsel saat kondisi normal pada beban puncak siang dan malam.....	60
Lampiran 6 Perbandingan tegangan saat kontingensi saluran Bantaeng Switch-Punagaya dan setelah kompensasi	64
Lampiran 7 Perbandingan tegangan saat kontingensi saluran Daya Baru- Sidrap dan setelah kompensasi	64
Lampiran 8 Perbandingan tegangan saat kontingensi saluran Wotu- Bungku dan setelah kompensasi	65
Lampiran 9 Perbandingan tegangan saat kontingensi saluran Bungku- Andowia dan setelah kompensasi	65
Lampiran 10 Perbandingan tegangan saat kontingensi saluran Andowia- Kendari dan setelah kompensasi	66



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kebutuhan energi listrik sudah menjadi kebutuhan dasar dalam kehidupan. Mulai dari penggunaan energi listrik di rumah tangga hingga pada industri-industri. Penggunaan energi listrik akan terus meningkat seiring dengan perkembangan zaman. Energi listrik merupakan energi yang dapat ditransmisikan dengan mudah dan memiliki efisiensi yang tinggi. Pengiriman energi listrik berasal dari pembangkit energi menuju beban (konsumen) melalui jaringan transmisi dan distribusi. Untuk memenuhi kebutuhan konsumen maka penyaluran energi listrik harus memperhatikan keberlanjutan dan kontinuitasnya.

Perkembangan teknologi yang sangat pesat dalam berbagai bidang beriringan dengan pertumbuhan kebutuhan energi listrik. Sektor industri merupakan salah satu sektor yang paling banyak membutuhkan energi listrik. Kebutuhan listrik pada sektor industri dikarenakan banyaknya beban induktif seperti motor listrik yang membutuhkan daya aktif dan daya reaktif yang besar. Dengan kebutuhan yang semakin meningkat maka penyedia listrik harus menyesuaikan dengan menunjang pembangkit listrik serta infrastruktur penyaluran listrik yang andal dan memadai. Penyedia energi listrik di Indonesia dalam hal ini PT. PLN terus meningkatkan kualitas dan kuantitas infrastruktur ketenagalistrikan seperti penambahan pembangkit listrik hingga peningkatan saluran transmisi.

Sulawesi Bagian Selatan (Sulbagsel) merupakan area sistem interkoneksi ketenagalistrikan yang terdapat di Sulawesi Selatan, Sulawesi Barat, Sulawesi Tengah dan Sulawesi Tenggara. Berdasarkan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT. PLN 2019-2028 akan dibangun pembangkit skala besar untuk menopang pertambahan beban khususnya di pusat beban seperti Makassar.

Makassar sebagai ibukota Provinsi Sulawesi Selatan memberikan kontribusi besar terhadap pertumbuhan ekonomi provinsi. Dengan pertumbuhan tersebut maka kebutuhan energi listrik juga tumbuh. Selain itu, adanya industri besar pengolahan mineral/tambang di Sulawesi Tenggara



juga membutuhkan energi listrik yang besar sehingga pembangkit listrik skala besar juga diperlukan. Beriringan dengan itu, maka akan dibangun saluran transmisi tegangan ekstra tinggi 500 kV sebagai *backbone* pada saluran interkoneksi Sulbagsel.

Pada perancangan sistem interkoneksi kelistrikan Sulbagsel perlu dibuat perencanaan keandalan operasi sistem yang dilakukan dalam bentuk studi kasus. Untuk memprediksi dampak yang ditimbulkan dari masalah yang potensial apabila elemen terpilih dari sistem tenaga dikeluarkan (*out of service*). Analisis kontingensi adalah studi pelepasan elemen jaringan yang disebabkan kegagalan pada saluran transmisi atau generator. Hasilnya menimbulkan perubahan terhadap aliran daya dan tegangan bus pada sistem.

Dengan adanya kontingensi maka diperlukan kompensasi terhadap daya reaktif untuk memperbaiki faktor daya ($\cos \phi$). Kapasitor merupakan salah satu alat yang dapat digunakan untuk mengatasi masalah faktor daya. Kapasitor pada prinsipnya bekerja sebagai suplai daya reaktif sehingga nilai faktor daya dapat diperbaiki. Untuk itulah pada tugas akhir ini akan membahas **“PENGARUH PEMASANGAN KOMPENSATOR TERHADAP TRANSMISI 500 kV PADA SISTEM KETENAGALISTRIKAN SULBAGSEL”** dengan melakukan simulasi menggunakan aplikasi Power Factory DigSilent 15.1. Simulasi pada tugas akhir ini akan dilakukan dengan aplikasi DigSilent yang dipandang dapat memberikan gambaran yang jelas pada kondisi dimana nilai faktor daya yang kecil akibat adanya skenario gangguan dapat diperbaiki.

1.2. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang ditarik dari latar belakang di atas yaitu sebagai berikut:

1. Bagaimana dampak yang ditimbulkan dari kontingensi pada sistem interkoneksi Sulbagsel 500 kV.
2. Bagaimana pengaruh dipasangnya kompensator pada titik bus yang lampak akibat uji kontingensi.



1.3. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Menganalisis dampak yang ditimbulkan dari kontingensi pada sistem interkoneksi Sulbagsel 500 kV.
2. Mengetahui pengaruh dipasangnya kompensator pada titik bus yang terdampak akibat uji kontingensi.

1.4. Batasan Masalah

Untuk menyederhanakan ruang lingkup penelitian ini maka ditentukan batasan-batasan sebagai berikut:

1. Sistem kelistrikan yang akan disimulasikan yaitu sistem kelistrikan Sulbagsel setelah rencana penambahan saluran transmisi 500 kV.
2. Data rencana penambahan transmisi 500 kV yang digunakan berdasarkan RUPTL PT. PLN PERSERO tahun 2019-2028.
3. Penambahan transmisi 500 kV pada sistem kelistrikan Sulbagsel fokus pada pemodelan single line diagram pada aplikasi Power Factory DigSILENT 15.1 dan data yang dibutuhkan single line diagram tersebut.
4. Penelitian hanya akan membandingkan tegangan sebelum dan sesudah pemasangan kompensator pada gardu induk yang mengalami dampak gangguan.
5. Aplikasi yang digunakan untuk melakukan simulasi yaitu Power Factory DigSilent 15.1.

1.5. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Dapat menjadi bahan masukan bagi PT. PLN dalam rangka pemasangan kapasitor bank pada rencana penambahan saluran transmisi 500 kV khususnya di wilayah Sulbagsel.
2. Dapat menjadi referensi dan pengetahuan bagi pembaca mengenai pengaruh penggunaan kapasitor bank pada gardu induk di sistem interkoneksi bagsel.
 sebagai kerangka acuan dalam penelitian-penelitian berikutnya.



1.6. Sistematikan Penulisan

Agar pembahasan dapat terstruktur dengan baik, maka sistematika penulisan dalam penyusunan tugas akhir ini sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang masalah, Rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, metode penelitian, serta sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi teori-teori yang berkaitan dengan penelitian yang diperoleh dari sumber referensi untuk menyusun kerangka teori dan konseptual.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi tempat penelitian, waktu penelitian, serta diagram alir penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas tentang hasil kegiatan penelitian, pembahasan masalah dan pemecahannya.

BAB V PENUTUP

Bab ini merupakan penutup yang berisi kesimpulan mengenai hasil pemecahan masalah yang diperoleh selama penyusunan tugas akhir dan juga saran untuk penelitian berikutnya yang berkaitan dengan tugas akhir ini.

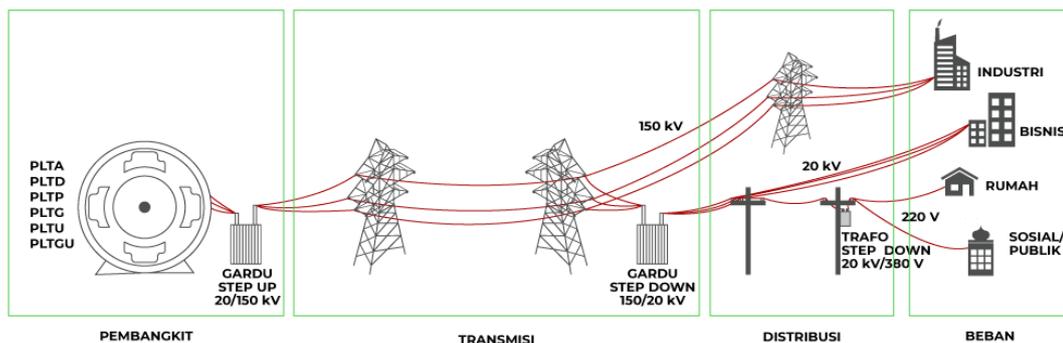


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan jaringan interkoneksi yang kompleks dimana terbagi atas bagian utama yakni generator, saluran transmisi, distribusi, dan beban (Sadaat, 1999). Bagian-bagian sistem ketenagalistrikan dapat dilihat pada Gambar 1 sebagai berikut.



Gambar 1 Sistem tenaga listrik

2.2. Sistem Daya Listrik

2.2.1. Daya aktif

Daya aktif adalah jumlah daya yang dipakai untuk melakukan energi yang sebenarnya. Daya yang diserap beban sebanding dengan hasil kali jatuh tegangan pada beban dengan arus yang mengalir melewati beban. Daya aktif inilah yang dikonversikan dalam bentuk kerja. Daya aktif dibutuhkan oleh beban agar dapat bekerja sesuai dengan fungsinya. Suatu daya dapat dikatakan baik apabila arus dapat sefasa dengan tegangan (Suhendar & Ardella, 2014). Daya aktif dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$P = V \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (1)$$

dimana,

P : daya listrik (W),

V : Tegangan kerja (V),

I : Arus yang mengalir (A),

φ : Beda fasa antara tegangan dan arus ($^{\circ}$).



2.2.2. Daya Reaktif

Daya reaktif merupakan suatu daya yang dikonsumsi oleh beban yang bersifat reaktif. Daya reaktif diperlukan dalam pembentukan medan magnet pada induktor. Daya reaktif dinotasikan Q dengan persamaan sebagai berikut (Suhendar & Ardella, 2014):

$$Q = V \cdot I \cdot \sin \theta \quad (2)$$

dimana,

$$Q = \text{Daya reaktif (VAR)}.$$

Daya reaktif merupakan faktor yang signifikan dalam pengoperasian sistem tenaga listrik. Daya tersebut disebabkan dari impedansi yang sebagian besar merupakan komponen reaktif. Penyaluran daya reaktif dapat mengakibatkan suatu perbedaan magnitudo tegangan. Selain dikonsumsi oleh elemen-elemen dari jaringan, daya reaktif juga dibutuhkan dalam pengoperasian peralatan seperti motor, transformator, dan peralatan elektronika daya (Syamsir & Nojeng, 2018).

2.2.3. Daya Nyata

Daya nyata (*apparent power*) merupakan daya yang diproduksi oleh perusahaan listrik pada sumber tenaga listrik untuk disalurkan ke beban/konsumen. Daya nyata sebanding dengan hasil kali harga rms (*root mean square*) dari tegangan dan arus dalam suatu jaringan listrik. Nilai rms merupakan nilai efektif dalam pengukuran (Syamsir & Nojeng, 2018). Daya nyata ini dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$S = V \cdot I \quad (3)$$

dimana,

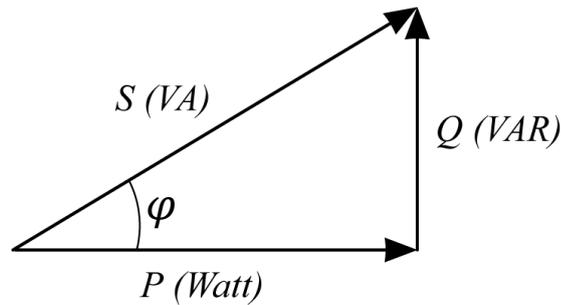
$$S = \text{Daya nyata (VA)}.$$

Apabila nilai tegangan dan arus telah diketahui maka dapat dilakukan perhitungan nilai daya aktif (P) dan daya reaktif (Q). Dalam bentuk kompleks, daya nyata dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$S = P + jQ \quad (4)$$



lupun hubungan antara daya aktif, daya reaktif, dan daya nyata dapat da segitiga daya yang ditunjukkan pada Gambar 2 berikut:



Gambar 2 Segitiga Daya

2.2.4. Faktor Daya

Faktor daya (*power factor*, PF) merupakan perbandingan anatar daya aktif (P) dengan daya nyata (S). faktor daya biasanya disebut juga dengan $\cos \varphi$. Faktor daya dapat ditunjukkan dalam persamaan (Syamsir & Nojeng, 2018):

$$PF = \cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (5)$$

Faktor daya dapat dikatakan baik apabila nilainya mendekati 100% (atau bernilai 1). Secara teori faktor daya dapat bernilai 1 namun dalam kenyataannya faktor daya tidak dapat bernilai 1 melainkan hanya mendekati 1 (Syamsir & Nojeng, 2018).

Jika beban listrik bersifat kapasitif, maka fasa arus mendahului fasa tegangan sehingga kondisi ini disebut dengan leading (mendahului). Jika beban listrik bersifat induktif, maka fasa arus tertinggal oleh fasa tegangan sehingga kondisi ini disebut dengan lagging (tertinggal) (Syamsir & Nojeng, 2018).

2.3. Saluran Transmisi

Pada umumnya pusat-pusat pembangkit (*electric power station*) yang menghasilkan energi listrik memiliki jarak yang jauh dengan pusat beban (*load center*). Energi listrik tersebut akan disalurkan ke pusat beban melalui saluran transmisi dan distribusi. Saluran transmisi menyalurkan listrik dengan saluran tegangan tinggi 150 kV atau saluran tegangan ekstra tinggi 500 kV. Penggunaan transformator *step down* akan menurunkan tegangan menjadi tegangan 70 kV, kemudian di gardu induk diturunkan menjadi tegangan primer 20 kV dan diturunkan lagi dengan transformator distribusi yang pusat-pusat beban menjadi 220/380 V (Zuhal, 1995).



Saluran transmisi merupakan saluran yang menghantarkan listrik yang dibangkitkan dari pusat pembangkit ke pusat-pusat beban. Terdapat dua sistem saluran transmisi yaitu saluran udara (overhead line) dan saluran bawah tanah (underground). Sistem saluran udara menyalurkan listrik menggunakan penghantar di udara, penghantar dipasang dengan bantuan tiang-tiang listrik sebagai penobangnya. Sedangkan sistem saluran bawah tanah menyalurkan listrik menggunakan kabel-kabel bawah tanah (Kundur, 1994). Saluran udara digunakan pada jarak yang panjang biasanya di daerah pedesaan, sedangkan saluran kabel atau bawah tanah biasanya digunakan di daerah perkotaan. Namun sistem bawah tanah dapat dikatakan lebih mahal 10 hingga 15 kali daripada saluran udara sehingga penggunaan saluran bawah tanah hanya pada situasi tertentu dimana saluran udara tidak dapat dipasang (Kundur, 1994).

Tegangan nominal dalam penyaluran tenaga listrik terbagi atas beberapa nilai tegangan. Berdasarkan dokumen IEC (International Electrotechnical Commission) 60038, tegangan transmisi dapat dikelompokkan menjadi: tegangan menengah (1kV - 35kV), tegangan tinggi (35kV - 230 kV), tegangan ekstra tinggi (230kV - 800kV) dan tegangan ultra tinggi (di atas 800kV).

Saluran transmisi dapat diklarifikasikan berdasarkan panjang saluran menjadi tiga yaitu saluran pendek, saluran menengah dan saluran panjang. Saluran pendek memiliki panjang saluran kurang dari 80 km, dimana efek kapasitansi paralel (*shunt*) yang dihasilkan sangat kecil sehingga dapat diabaikan dalam perhitungan tanpa pengaruh yang berarti terhadap ketelitian perhitungan. Saluran menengah memiliki panjang saluran 80 – 240 km, dimana pada umumnya memiliki karakteristik yang sama dengan saluran pendek, hanya saja efek kapasitansinya sudah mesti diperhitungkan. Saluran panjang memiliki panjang lebih dari 240 km, dimana perlu adanya ketelitian dalam analisisnya. Perlu diperhatikan bahwa parameter rangkaian pada dasarnya tidak terpusat menjadi satu melainkan tersebar merata di sepanjang saluran (Zuhal, 1995).



Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi

Saluran transmisi penyaluran energi listrik menggunakan saluran tegangan ekstra tinggi yang ekonomis dan menguntungkan, dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Untuk penyaluran daya yang sama, arus yang dialirkan memiliki nilai yang lebih kecil. Hal tersebut berarti bahwa penggunaan bahan tembaga pada kawat penghantar akan menjadi lebih sedikit karena arus yang mengalir kecil.
2. Luas penampang konduktor menjadi lebih kecil maka struktur penyangga konduktor akan menjadi lebih kecil.
3. Arus yang mengalir pada saluran memiliki nilai yang kecil sehingga jatuh tegangan juga menjadi kecil (Zuhal, 1995).

Namun demikian, penambahan tegangan pada saluran transmisi menyebabkan jarak bebas antara kawat penghantar harus lebih berjarak, panjang gandingan isolator pun harus lebih besar. Hal tersebut menyebabkan biaya menara dan konstruksi penopang menjadi lebih besar (Zuhal, 1995).

2.5. Beban Listrik

Secara umum, beban dibedakan berdasarkan karakteristiknya kedalam empat kategori yaitu beban perumahan, beban industri, beban komersil, dan beban fasilitas umum. Masing-masing sektor pembebanan tersebut memiliki karakteristik yang berbeda. Hal tersebut dikarenakan pola konsumsi listrik pada masing-masing sektor yang berbeda. Pada sektor perumahan, fluktuasi konsumsi energi dapat dilihat secara jelas, hal tersebut dapat dilihat pada kondisi penggunaan listrik yang dominan di malam hari. Pada sektor industri, fluktuasi konsumsi energi akan cenderung sama karena peralatan industri biasanya beroperasi 24 jam terutama industri besar (Suswanto, 2009).

Beban pada sistem tenaga listrik bersifat fluktuatif. Karakteristik suatu beban memberikan pengaruh terhadap kapasitas (*capacity*) dan kemampuan (*capability*) sistem dalam menyalurkan daya listrik. Jaringan tenaga listrik yang luas dan berkembang menyebabkan pengoperasian sistem tenaga menjadi lebih rumit. Salah satu masalah yang dapat timbul yaitu terjadinya gangguan yang menyebabkan tegangan pada sistem menjadi tidak stabil (Prayitno, Penangsang, &

016).



2.6. Kestabilan Tegangan

Kestabilan tegangan adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk mempertahankan kestabilan level tegangan pada batas yang diizinkan pada semua bus ketika terjadi gangguan (Adityo, 2012). Sistem tenaga listrik dapat dikatakan stabil apabila mampu mempertahankan level tegangan sesuai dengan standar yang diizinkan dalam jangka waktu tertentu ketika terjadi gangguan. Adapun ketidakstabilan tegangan dapat terjadi akibat ketidaksinkronan kebutuhan beban dengan pembangkitan tenaga listrik. Gangguan yang biasanya terjadi yaitu lepasnya beban yang signifikan ataupun lepasnya generator pembangkit sehingga tegangan berisolasi tidak stabil.

Berdasarkan jenisnya, gangguan dapat dikategorikan menjadi dua yaitu gangguan besar dan gangguan kecil;

1. Gangguan besar yang terjadi adalah hilangnya suplai dari generator (*generator outage*), perubahan beban yang besar dan *short circuit*.
2. Gangguan kecil yaitu perubahan beban dengan kapasitas yang kecil.

Sedangkan berdasarkan jangka durasinya, gangguan dibedakan menjadi gangguan jangka pendek dan jangka panjang;

1. Gangguan kestabilan jangka pendek mengakibatkan *voltage dip* dan *voltage swell*.
2. Gangguan kestabilan jangka panjang dapat mengakibatkan *undervoltage* dan *over voltage*.

Gangguan dalam sistem tenaga listrik salah satunya yaitu adanya jatuh tegangan. Hal ini diakibatkan oleh beberapa hal, diantaranya adalah jarak tempuh antara pusat beban dengan pusat sumber energi listrik yang cukup jauh dan beban yang cukup besar sehingga tegangan pada ujung saluran mengalami penurunan. Akibat dari jatuh tegangan ini dapat mengganggu kinerja dan keamanan alat-alat elektronik yang ada di sisi beban dalam hal ini konsumen atau rumah-rumah pelanggan (Uno, Amali, & Tolago, 2019).

Hal-hal yang perlu diperhatikan untuk menjaga keberlangsungan pasokan trik ke konsumen yaitu dengan menjaga kestabilan nilai frekuensi, sudut 1 level tegangan pada sistem sehingga pendistribusian energi dapat ung dengan optimal. Masing-masing nilai frekuensi dan level tegangan



dusahakan berada pada nilai standar kelistrikan yang berlaku (Uno, Amali, & Tolago, 2019).

Bertambahnya beban yang bersifat induktif membutuhkan suplai daya reaktif yang besar sehingga sumber (pembangkit listrik) harus menyuplai daya yang lebih besar. Keadaan seperti ini dapat menyebabkan jatuh tegangan, arus pada jaringan bertambah dan faktor daya rendah pada daerah dekat beban. Salah satu cara yang efektif dan efisien untuk mendapatkan nilai yang optimum pada sistem tenaga listrik adalah dengan instalasi capasitor bank, yang bertujuan untuk memperbaiki faktor daya pada sistem (Ulya, 2019).

2.7. Kapasitor Bank

Kapasitor bank merupakan sejumlah modul kapasitor yang dihubungkan satu dengan yang lainnya secara paralel. Kapasitor bank memiliki sifat kapasitif yang dapat digunakan untuk kompensasi daya reaktif yang dihasilkan oleh sistem. Besaran yang dipakai untuk kapasitor bank adalah VAR (Volt Ampere Reaktif), meskipun begitu kapasitor sendiri tercantum besaran kapasitansi yaitu farad atau microfarad (Billahi, Haryudo, & Kartini, 2021).

Kapasitor bank memberikan manfaat dalam proses kinerja sistem distribusi dimana kapasitor bank dapat mengurangi losses, memperbesar kapasitas layanan dan mengurangi jatuh tegangan. Penempatan kapasitor bank diperlukan untuk menanggulangi permasalahan jatuh tegangan yang terjadi baik pada saluran transmisi bertegangan tinggi maupun saluran distribusi tegangan menengah (Uno, Amali, & Tolago, 2019).

Kapasitor bank merupakan peralatan listrik yang bersifat kapasitif yang berfungsi menyeimbangkan sifat induktif. Salah satu manfaat kapasitor adalah memperbaiki profil tegangan, memperbaiki $\cos \phi$ dan mengurangi rugi-rugi daya. Unit-unit kapasitor terpasang dalam rak baja galvanis untuk membentuk suatu bank kapasitor dari unit-unit kapasitor fasa tunggal. Jumlah unit-unit kapasitor pada sebuah bank ditentukan oleh tegangan dan daya yang dibutuhkan. Untuk tegangan yang lebih tinggi, atau sesuai dengan kebutuhan daya maka disusun secara seri dan paralel sehingga membentuk kapasitor bank (Uno, 2018).



Kapasitor yang akan digunakan untuk memperbesar faktor daya dipasang paralel dengan rangkaian beban. Bila rangkaian itu diberi tegangan maka elektron akan mengalir masuk ke kapasitor. Pada saat kapasitor penuh dengan muatan elektron maka tegangan akan berubah. Kemudian elektron akan ke luar dari kapasitor dan mengalir ke dalam rangkaian yang memerlukannya dengan demikian pada saat itu kapasitor membangkitkan daya reaktif. Bila tegangan yang berubah itu kembali normal (tetap) maka kapasitor akan menyimpan kembali elektron. Pada saat kapasitor mengeluarkan elektron (I_c) berarti sama juga kapasitor menyuplai daya reaktif ke beban. Karena beban bersifat induktif (+) sedangkan daya reaktif bersifat kapasitif (-) akibatnya daya reaktif yang berlaku menjadi kecil (Darusman, 2018).

