

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan elemen esensial dalam infrastruktur kelistrikan yang berfungsi mendistribusikan energi dari gardu distribusi hingga ke pengguna akhir. Jaringan distribusi 20 kV menjadi salah satu bagian krusial dalam sistem ini, di mana mutu kinerjanya berpengaruh secara signifikan terhadap tingkat keandalan serta efisiensi operasional secara keseluruhan (Glover, 2016).

Salah satu persoalan krusial dalam jaringan distribusi adalah terjadinya penurunan tegangan, yakni kondisi ketika tegangan yang diterima oleh beban lebih rendah dibandingkan dengan tegangan yang disediakan oleh sumber. Fenomena ini memberikan dampak merugikan terhadap mutu penyaluran energi listrik. Penurunan tegangan dipengaruhi oleh sejumlah faktor, antara lain resistansi (R) dan reaktansi (X) pada rangkaian. Resistansi, yang timbul akibat karakteristik material serta panjang penghantar, menyebabkan sebagian energi listrik terkonversi menjadi panas ketika arus mengalir melaluinya, sehingga tegangan mengalami penurunan (Hayt, 2019).

Reaktansi, yang meliputi unsur induktansi (L) dan kapasitansi (C), berperan memberikan hambatan terhadap dinamika perubahan arus listrik, sehingga memunculkan pergeseran fase antara tegangan dan arus. Gabungan antara resistansi dan reaktansi menghasilkan impedansi (Z), yang berfungsi menentukan besarnya penurunan tegangan saat arus mengalir melalui suatu penghantar. Secara umum, peningkatan nilai resistansi maupun reaktansi pada

sebuah rangkaian akan mengakibatkan penurunan tegangan yang lebih signifikan (Sadiku, 2020).

Penurunan tegangan juga dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti panjang saluran penghantar, intensitas arus listrik, dan kondisi beban yang tidak merata. Berdasarkan SPLN (Standard Perusahaan Listrik Negara), batas maksimum penurunan tegangan yang diperbolehkan pada sistem distribusi 20 kV adalah sekitar 5% dari tegangan nominal. Jika nilai tersebut terlampaui, kualitas tegangan yang diterima pelanggan akan menurun, sehingga kinerja peralatan listrik menjadi tidak optimal bahkan dapat mengalami kerusakan. Oleh sebab itu, diperlukan tindakan preventif untuk mengurangi penurunan tegangan demi menjaga keandalan dan kestabilan jaringan distribusi listrik.

Penelitian ini dilaksanakan pada Gardu Induk Payageli yang dilengkapi empat unit transformator berkapasitas 60 MVA masing-masing. Transformator pertama (TD1) mengoperasikan tujuh feeder, sedangkan Transformator kedua (TD2), ketiga (TD3), dan keempat (TD4) masing-masing menyuplai delapan feeder. Fokus kajian difokuskan pada Trafo 2, karena berbeda dengan TD1, TD3, dan TD4 yang telah terintegrasi dengan sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR), pada Trafo 2 belum diterapkan instalasi AVR. Kondisi tersebut menjadikan Trafo 2 mengalami permasalahan teknis yang lebih dominan dibandingkan transformator lainnya.

Berdasarkan hasil pengamatan, pada saat beban puncak Trafo 2 mengalami penurunan tegangan hingga 18,912 kV (94,56%), disertai kerugian daya aktif sebesar 94,2 kW dan kerugian daya reaktif mencapai 4240,9 kvar,

dengan faktor daya hanya 80,7%. Keadaan tersebut mencerminkan adanya ketidakseimbangan antara komponen daya aktif dan reaktif yang, secara keseluruhan, berpotensi mengganggu kestabilan jaringan distribusi, menurunkan efektivitas operasi, meningkatkan kehilangan energi, serta mengurangi tingkat keandalan pasokan listrik kepada pengguna akhir.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, diperlukan kompensasi daya reaktif yang memiliki karakteristik dinamis serta mampu merespons fluktuasi beban secara cepat. *Static Var Compensator* (SVC) dipilih karena perangkat ini dapat memasukkan daya reaktif kapasitif (Qc) ketika terjadi penurunan tegangan dan menyerap daya reaktif induktif (QL) saat tegangan melebihi batas, sehingga kestabilan tegangan tetap terjaga pada nilai nominal. Dibandingkan kapasitor shunt konvensional, SVC memiliki keunggulan karena mampu menyesuaikan kinerjanya secara real-time terhadap variasi profil beban (Anthony et al., 2022).

Penggunaan transformator maupun metode alternatif, seperti penempatan kapasitor shunt, tidak memiliki efektivitas setara dengan SVC dalam memberikan respons yang cepat serta adaptif terhadap fluktuasi beban. Transformator lebih tepat diterapkan untuk perubahan tingkat tegangan dan tidak mampu menyesuaikan daya reaktif secara cepat sebagaimana kinerja SVC. Sementara itu, kapasitor shunt, meskipun berfungsi dalam mengurangi penurunan tegangan, tidak mempunyai karakteristik dinamis untuk menyesuaikan kompensasi reaktif sesuai kondisi sistem secara *real-time* sebagaimana yang dapat dicapai oleh SVC.

Pemasangan SVC bertujuan utama untuk mempertahankan kestabilan tegangan pada bus dalam sistem jaringan sekaligus meminimalkan fluktuasinya

melalui injeksi daya reaktif yang dikontrol dengan pengaturan arus kapasitif maupun induktif. Penentuan ukuran SVC yang paling optimal dilakukan melalui penerapan metode optimasi dengan fungsi objektif yang diformulasikan berdasarkan parameter rugi tegangan (V_{loss}) serta kapasitas SVC (Nugraha et al., 2021).

Penetapan kapasitas SVC yang optimal memegang peranan krusial guna menghindari terjadinya kondisi overkompensasi maupun underkompensasi pada sistem. Apabila kapasitas SVC dirancang terlalu besar, maka akan timbul kelebihan daya reaktif, sedangkan kapasitas yang terlalu kecil tidak mampu secara efektif memperbaiki penurunan tegangan. Oleh sebab itu, diperlukan suatu pendekatan optimasi yang dapat menghitung besaran kapasitas SVC secara akurat sesuai dengan karakteristik sistem yang sedang dianalisis. Penyelesaian terhadap permasalahan tersebut dapat dicapai melalui penerapan metode optimasi untuk memperoleh kapasitas SVC yang paling sesuai. Salah satu teknik yang digunakan dalam hal ini adalah *Particle Swarm Optimization* (PSO).

Meskipun kapasitas SVC secara teoritik dapat ditentukan melalui formulasi konvensional yang berbasis pada sudut faktor daya ($\cos \phi$), metode tersebut hanya berlaku efektif pada sistem yang bersifat statis serta linier. Pada praktiknya, jaringan distribusi tenaga listrik memiliki karakteristik yang kompleks dan dinamis, ditandai oleh perubahan profil beban secara temporal, variasi impedansi antar penyulang, serta interaksi antara daya aktif dan reaktif yang saling memengaruhi. Akibatnya, pendekatan konvensional kerap tidak

memberikan hasil yang sepenuhnya optimal bagi kinerja sistem secara keseluruhan.

Dalam hal ini, metode optimasi metaheuristik, khususnya *Particle Swarm Optimization* (PSO), memiliki relevansi yang signifikan. Melalui PSO, ruang solusi yang luas dapat dieksplorasi secara efektif untuk menentukan kapasitas SVC yang paling optimal dari perspektif global, dengan memperhitungkan seluruh parameter sistem secara bersamaan. Pendekatan ini tidak hanya mengutamakan satu tujuan spesifik, melainkan juga menganalisis beragam alternatif konfigurasi daya aktif, daya reaktif, karakteristik tegangan, serta distribusi lokasi beban, sehingga menghasilkan kapasitas SVC yang benar-benar efektif untuk menanggulangi penurunan tegangan.

Pemanfaatan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) untuk menentukan ukuran SVC yang paling optimal dipilih karena algoritma ini memiliki kemampuan eksplorasi sekaligus eksploitasi yang efektif dalam menemukan solusi terbaik pada ruang pencarian yang kompleks. PSO mengadopsi prinsip perilaku sosial kawanan burung maupun ikan yang berkoordinasi untuk memperoleh solusi optimum melalui proses iteratif serta pembelajaran dari pengalaman individu dalam kelompok. Jika dibandingkan dengan teknik optimasi lain, seperti *Genetic Algorithm* (GA) maupun *Simulated Annealing* (SA), PSO menawarkan keunggulan berupa kecepatan konvergensi yang lebih tinggi dan prosedur implementasi yang relatif lebih sederhana.

Melalui kemampuan eksplorasi serta eksploitasi yang efektif, *Particle Swarm Optimization* (PSO) diterapkan pada penelitian ini guna memperoleh

kapasitas SVC yang paling optimal. Tujuan utama pendekatan tersebut ialah meminimalkan penurunan tegangan sekaligus meningkatkan faktor daya pada Trafo II Gardu Induk Payageli. Metode ini diharapkan dapat mempertahankan tegangan dalam batas standar yang diizinkan serta memperbaiki kualitas faktor daya sistem, sehingga kestabilan kinerja jaringan distribusi listrik tetap terjamin.

1.2 Identifikasi Masalah

Beberapa Identifikasi masalah yang ada pada penelitian ini adalah :

1. Terjadinya jatuh tegangan pada Gardu Induk Payageli, yang berdampak pada kualitas tegangan di jaringan distribusi 20 kV.
2. Jatuh tegangan disebabkan oleh tingginya beban reaktif, yang mengakibatkan penurunan faktor daya dan peningkatan rugi-rugi daya dalam sistem.
3. Belum tersedianya *Static Var Compensator* (SVC) atau kapasitor bank sebagai perangkat kompensasi daya reaktif untuk menjaga stabilitas tegangan.
4. Peningkatan kapasitas beban yang signifikan serta jarak beban terhadap transformator yang cukup jauh, menyebabkan penurunan tegangan yang lebih besar di ujung jaringan distribusi.
5. Belum diterapkannya metode optimasi dalam menentukan kapasitas optimal SVC, sehingga perbaikan jatuh tegangan belum maksimal.

1.3 Batasan Masalah

Adapun yang menjadi batasan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut :

1. Analisis hanya dilakukan pada penyulang 20 kV yang terhubung ke Trafo 2 (TD2) Gardu Induk Payageli, dengan fokus utama pada perbaikan profil tegangan dan faktor daya di Bus 7.
2. Penelitian ini membatasi penggunaan *Particle Swarm Optimization* (PSO) sebagai metode optimasi tunggal untuk menentukan ukuran *Static Var Compensator* (SVC) yang optimal dalam memperbaiki jatuh tegangan.
3. Variasi beban dipertimbangkan berdasarkan profil tegangan aktual selama 24 jam, mencakup tiga mode operasi: jatuh tegangan (*under-voltage*), tegangan rata-rata, dan tegangan lebih (*over-voltage*).
4. Lokasi pemasangan SVC tidak dioptimasi, karena titik pemasangan sudah ditentukan pada Bus 7, yang merupakan titik strategis karena terhubung langsung dengan 8 *feeder downstream* sehingga lebih optimal dalam memperbaiki tegangan seluruh penyulang.
5. Penelitian ini tidak melakukan perbandingan kinerja PSO secara mendalam dengan metode optimasi lainnya seperti *Genetic Algorithm* (GA) atau *Simulated Annealing* (SA). Fokus utama tetap pada efektivitas PSO dalam menentukan ukuran SVC yang optimal.
6. Periode analisis dibatasi pada kondisi operasi sistem dalam rentang waktu tertentu, sehingga hasil penelitian mencerminkan kondisi sistem pada periode tersebut dan tidak mencakup variasi musiman atau jangka panjang.
7. Optimasi hanya difokuskan pada penentuan kapasitas SVC (Q_c dan Q_L) yang paling berpengaruh terhadap deviasi tegangan pada Bus 7 dan penyulang downstream.

8. Evaluasi kinerja sistem difokuskan pada perbaikan tegangan sesuai standar SPLN $\pm 5\%$.
9. Rugi daya hanya diamati sebagai data pendukung untuk mengetahui kondisi sistem setelah tegangan diperbaiki dengan PSO, namun bukan menjadi parameter utama optimasi.
10. Tidak mencakup analisis dampaknya terhadap parameter kualitas daya lainnya.

1.4 Rumusan Masalah

Adapun yang menjadi Rumusan Masalahnya sebagai berikut :

1. Bagaimana penerapan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) dalam menentukan kapasitas *Static Var Compensator* (SVC) yang optimal untuk meminimalkan jatuh tegangan pada Bus 7 Trafo TD2 Gardu Induk Payageli?
2. Bagaimana cara menentukan ukuran *Static Var Compensator* dengan menggunakan metode PSO berdasarkan profil tegangan aktual yang fluktuatif selama 24 jam??
3. Seberapa besar perbaikan tegangan yang dicapai setelah pemasangan SVC hasil optimasi PSO dibandingkan dengan kondisi sebelum pemasangan?

1.5 Tujuan Penelitian

Adapun yang menjadi tujuan penelitian sebagai berikut :

1. Untuk menerapkan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) dalam menentukan kapasitas *Static Var Compensator* (SVC) yang optimal guna

meminimalkan jatuh tegangan pada Bus 7 Trafo TD2 Gardu Induk Payageli.

2. Untuk menentukan ukuran SVC yang optimal menggunakan metode PSO berdasarkan profil tegangan aktual yang fluktuatif selama 24 jam.
3. Untuk mengetahui seberapa besar perbaikan tegangan yang dicapai setelah pemasangan SVC hasil optimasi PSO dibandingkan dengan kondisi sebelum pemasangan.

1.6 Manfaat Penelitian

Dengan adanya penelitian ini, Diharapkan akan memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Dengan menentukan kapasitas *Static Var Compensator* (SVC) yang optimal, penelitian ini dapat memperbaiki profil tegangan pada sistem distribusi 20 kV sehingga kualitas tegangan sesuai standar SPLN.
2. Penelitian ini dapat meningkatkan wawasan dan pemahaman terkait penerapan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) dalam menentukan ukuran SVC yang adaptif terhadap profil tegangan fluktuatif.
3. Penelitian ini memberikan referensi praktis mengenai langkah-langkah penentuan kapasitas SVC secara optimal menggunakan metode optimasi metaheuristik.
4. Penelitian ini dapat menambah pengetahuan dalam memanfaatkan metode praktis dalam masalah penentuan ukuran SVC.