

BAB I

PENDAHULUAN

Terdapat beberapa persoalan pelik yang sekarang ini di hadapi sistem kelistrikan di Indonesia. Persoalan kekurangan pasokan daya listrik merupakan salah satu persoalan yang sampai sekarang belum dapat sepenuhnya teratasi. Penambahan kapasitas pembangkit eksisting atau pembangunan pembangkit baru merupakan solusi yang paling *reasonable*, karena kekurangan pasokan daya tentu paling tepat diatasi dengan menambah pasokan daya. Persoalannya kemudian adalah selain membutuhkan waktu lama, solusi tersebut juga membutuhkan investasi yang tidak sedikit. Melihat kondisi ekonomi yang sedang kurang baik dewasa ini, solusi tersebut sepertinya sulit untuk ditempuh.

Krisis energi merupakan persoalan yang secara global dihadapi oleh banyak negara termasuk Indonesia. Energi listrik merupakan bentuk energi yang cukup dominan dimanfaatkan serta mengalami peningkatan kebutuhan dari waktu ke waktu. Kemampuan sistem kelistrikan untuk meningkatkan kapasitas pembangkitan yang tidak sebanding dengan peningkatan kebutuhan daya listrik mengakibatkan defisit energi listrik. Akibat yang ditimbulkannya bukan hanya terhentinya proses elektrifikasi daerah yang belum mendapatkan aliran daya, tetapi juga kemungkinan dilakukannya pemadaman bergilir karena keterbatasan pasokan daya. Defisit daya listrik juga mengakibatkan penurunan kualitas daya yang disuplaikan ke konsumen.

Kenaikan harga Bahan Bakar Minyak (BBM) yang pada saat ini dan pada masa mendatang bisa jadi merupakan hal yang tak terhindarkan akan semakin menurunkan kemampuan sistem pembangkit meningkatkan kapasitasnya karena tingkat ketergantungannya yang cukup tinggi pada BBM. Tingginya harga BBM sesungguhnya telah mendorong penelitian dan pengembangan pemanfaatan sumber energi lain terbarukan untuk keperluan pembangkitan daya listrik. Akan tetapi beberapa kesulitan terkait hal tersebut masih dihadapi. Selain kuantitas daya pembangkitannya yang belum secara signifikan dapat mengkontribusi kebutuhan

pasokan daya, sinkronisasi sistem pembangkitannya terhadap jaringan kelistrikan juga masih menjadi kendala. Masih perlu terus diupayakan pengembangannya sampai dengan diperoleh pembangkitan menggunakan sumber energi terbarukan dengan skala komersial termasuk sinkronisasinya terhadap sistem kelistrikan sampai dengan terbangunnya *grid connected system* (sistem tersambung ke jaringan).

Terdapat fenomena lain yang seringkali luput dari perhatian namun berkontribusi secara cukup signifikan pada defisit energi listrik, yaitu besarnya susut daya jaringan. Persoalan tersebut telah secara faktual mengakibatkan defisit energi dan penurunan kualitas daya listrik. Karakteristik jaringan dan beban yang bersifat induktif menyebabkan turunnya faktor daya dan memaksa pembangkit menyediakan daya lebih besar untuk beban yang sama serta mempengaruhi profil tegangan.

Data real di lapangan menunjukkan bahwa secara umum nilai susut daya maupun daya yang dicuri melebihi estimasi yang ditetapkan oleh PLN (Kompas 10/03/2006; Suara_Merdeka Senin, 23 Agustus 2004). Kehilangan daya dalam jumlah besar ini pada gilirannya mengakibatkan kerugian finansial yang cukup signifikan. Nilai susut daya di jaringan yang nilainya lebih dari 10 % mengakibatkan kerugian finansial yang tidak sedikit, karena susut daya sebesar 1 % pada sistem kelistrikan PLN setara kurang lebih dengan kerugian finansial sebesar satu triliun rupiah pertahun (Republika 12/03/2008). Pada sisi lain, nilai daya yang hilang di sistem kelistrikan PLN akibat pencurian daya nilainya juga cukup besar, yaitu sekitar 11.44 persen dari total produksi daya yang dihasilkan PLN secara nasional. Kehilangan daya ini mengakibatkan kerugian finansial yang nilainya bahkan lebih besar dari margin keuntungan PLN (Kompas 27/02/2006).

Untuk mengatasi persoalan susut daya tersebut, biasanya kapasitor *shunt* dipasang pada sisi sekunder trafo daya Gardu Induk (GI) dan pada penyulang (*feeder*) jaringan distribusi sistem tenaga listrik. Kapasitor shunt yang dipasang pada GI digunakan untuk mengendalikan aliran daya reaktif yang mengalir melalui trafo sehingga aliran daya reaktif dapat diminimalkan dan efisiensi operasi sistem dapat

dinaikkan (Liang and Cheng 2001; Liang and Wang 2003). Sementara kapasitor *shunt* yang dipasang pada penyulang distribusi digunakan untuk memasok daya reaktif sedemikian, sehingga tegangan sepanjang feeder dapat dipertahankan pada batas-batas yang diijinkan serta susut daya dapat diminimalkan. Meskipun demikian kapasitor-kapasitor tersebut perlu dilepaskan dari jaringan pada kondisi beban rendah untuk menghindarkan sistem dari kondisi tegangan lebih (*overvoltage*).

Strategi operasi sebagaimana diuraikan merupakan strategi pengendalian daya reaktif/tegangan yang merupakan salah satu upaya untuk mengatur kebutuhan daya reaktif sekaligus mempertahankan profil tegangan pada batas-batas yang diijinkan. Pengendalian dimaksud dapat dilakukan dengan mengatur pengubah sadapan beban (*load tap changer/LTC*) trafo dan penjadwalan operasi kapasitor tersaklar. Karena pengaturan komponen-komponen tersebut mempengaruhi kondisi operasi sistem dalam pola relasi yang sangat tidak linear (*highly non linear*), maka pengaturannya perlu dilakukan secara cermat dan hati-hati. Simulasi dan perhitungan perlu dilakukan sebelum pengaturan untuk sistem real dilakukan, agar dapat dihindari pengaruh destruktif dari strategi operasi tersebut.

Upaya pemasangan kapasitor dan pengendalian operasinya dapat dipandang sebagai solusi alternatif terhadap persoalan kekurangan pasokan daya listrik. Upaya ini perlu dilakukan sebelum dilakukan penambahan kapasitas pembangkit eksisting atau pembangunan pusat pembangkit baru. Dari sudut pandang ekonomi, nilai investasi kapasitor jauh lebih murah dibandingkan dengan penambahan kapasitas pembangkit eksisting atau pembangunan pembangkit baru selain waktu instalasinya yang jauh lebih singkat. Kompensasi daya reaktif karena pemasangan kapasitor yang mampu memperbaiki profil tegangan pada sisi lain juga akan merupakan keuntungan lain disamping minimisasi susut daya jaringan.

Meskipun demikian, pemasangan kapasitor tetaplah merupakan upaya optimisasi sistem kelistrikan dan bukan upaya penambahan pasokan daya yang baru. Artinya, keuntungan pemasangan kapasitor tetap terbatas pada upaya meminimalkan rugi-rugi daya jaringan yang secara simultan memperbaiki profil tegangan.

Diharapkan dengan upaya tersebut, susut daya dapat diminimalkan sehingga lebih banyak daya yang dibangkitkan pembangkit dapat dimanfaatkan. Jika kemudian sistem telah beroperasi secara optimal dan beban sistem tetap tidak dapat sepenuhnya terlayani karena kekurangan pasokan daya, maka penambahan kapasitas pembangkit atau pembangunan pusat pembangkit baru tetap harus dilakukan. Tetapi langkah tersebut hanya akan merupakan solusi yang *feasible* jika sistem yang ada telah dioperasikan secara optimal. Kondisi sistem kelistrikan di Indonesia dewasa ini dicirikan oleh kondisi-kondisi: susut daya yang tinggi, kapasitas pembangkit yang lebih dari cukup tetapi terjadi defisit daya, profil tegangan yang buruk, tingginya tingkat pencurian daya listrik dan (menurut pengakuan PLN) terjadi defisit keuangan. Melihat kondisi tersebut, pemasangan kapasitor dalam upaya meminimalkan rugi-rugi daya jaringan dan memperbaiki profil tegangan perlu dilakukan disamping upaya-upaya lain dalam rangka memperbaiki kondisi sistem kelistrikan di Indonesia.

Secara teknis kapasitor *shunt* yang akan dipasang pada jaringan distribusi perlu ditentukan secara hati-hati baik ukuran maupun lokasinya (Masoum, Jafarian et al. 2004; Masoum, Ladjevardi et al. 2004; Masoum, Ladjevardi et al. 2004). Kesalahan menentukan ukuran dan lokasi kapasitor bukan saja mengakibatkan masalahnya tidak terselesaikan, tetapi bahkan berpeluang memperburuk kondisi sistem dan menimbulkan masalah lain, berupa distorsi harmonik pada tegangan sistem secara berlebihan serta kerusakan pada kapasitor dan komponen sistem lainnya. Pertimbangan lain diperlukannya menentukan secara teliti ukuran dan lokasi kapasitor adalah biaya investasi pengadaan dan pemasangan kapasitor yang tidak murah.

Kesulitan yang seringkali ditemui dalam menentukan nilai dan lokasi kapasitor adalah terkait dengan hubungan yang sangat tidak linier (*highly nonlinear*) antara penambahan komponen sistem kelistrikan dengan perubahan kondisi operasi sistem (Deng and Ren 2001; Deng, Ren et al. 2002). Fenomena yang kemudian ditemui adalah penambahan komponen sistem (dalam hal ini kapasitor) di lokasi tertentu akan memberikan pengaruh yang luas pada sistem yang diperhitungkan.

Penentuan lokasi kapasitor bukan merupakan fokus dari penelitian ini. Dalam penelitian ini, lokasi kapasitor diasumsikan telah ditentukan secara optimal dan untuk memberikan manfaat yang lebih besar, kapasitor yang telah terpasang tersebut perlu dikendalikan operasinya. Pengendalian tersebut dimaksudkan untuk merespon karakteristik dinamis beban sistem kelistrikan, yaitu beban yang selalu berubah, sehingga komponen terpasang perlu dikendalikan. Selain kapasitor, terdapat piranti lain yang dapat dikendalikan dalam rangka perbaikan profil tegangan dan minimisasi susut daya, yaitu pengubah sadapan beban (*load tap changer/LTC*). Pengendalian simultan kedua tipe komponen tersebut akan memberikan manfaat maksimal tujuan optimisasi. Untuk keperluan tersebut LTC trafo dan kapasitor tersakelar dilakukan penjadwalan operasinya. Penjadwalan operasi yang dimaksud adalah penentuan status sambungan kapasitor dan posisi tap LTC dalam tiap dalam sehari (24 jam). Karena pengendalian komponen-komponen tersebut juga mempengaruhi kondisi operasi sistem dalam pola relasi yang sangat tidak linear (*highly non linear*), maka pengendaliannya perlu dilakukan secara cermat dan hati-hati. Simulasi dan perhitungan perlu dilakukan sebelum pengendalian pada sistem real dilakukan, agar dapat dihindari pengaruh destruktif dari strategi operasi tersebut.

Hubungan tak linier antara perubahan status komponen tersakelar, beban sistem kelistrikan, daya yang dibangkitkan dengan tegangan sistem dan rugi-rugi sistem dapat secara teliti diperhitungkan dengan analisis aliran beban (*load flow analysis*). Secara matematis perhitungan aliran beban dapat dilakukan dengan mencari solusi atas seperangkat persamaan linier simultan banyak berubah (*multi-variable simultaneous linear equations*). Penyelesaian persoalan tersebut membutuhkan metode komputasi tingkat tinggi yang melibatkan prosedur iteratif. Beban komputasi dari perhitungan aliran beban pada gilirannya sangat tinggi. Pada sisi lain, karena melibatkan prosedur iteratif, ketelitian hasil perhitungan aliran beban akan tergantung pada jumlah iterasi dan kriteria konvergensi yang biasanya ditentukan dengan derajat toleransi kesalahan. Hal lain yang berkontribusi

ketelitian hasil perhitungan adalah metode yang dipakai dalam analisis aliran beban. Untuk memperoleh hasil perhitungan dengan ketelitian yang tinggi, jumlah iterasinya dapat ditingkatkan dan derajat toleransi kesalahannya diperkecil. Akan tetapi, hal ini akan memperberat beban komputasi. Metode yang lebih kompleks, yang karenanya lebih rumit, juga biasanya dapat memberikan hasil perhitungan yang lebih teliti. Hal ini juga akan meningkatkan beban komputasi. Pemilihan metode yang tepat disertai penentuan jumlah iterasi dan tingkat toleransi kesalahan yang proporsional akan memberikan hasil perhitungan dengan tingkat ketelitian yang bisa diterima (*acceptable*) dengan beban komputasi yang rasional.

Jaringan distribusi merupakan sistem tiga fasa dan seringkali tidak seimbang yang diakibatkan oleh perubahan konfigurasi jaringan dan ketidakseimbangan beban. Untuk keperluan penyederhanaan, estimasi dan analisis seringkali dilakukan dengan mendasarkan pada asumsi bahwa sistem dalam keadaan seimbang, sehingga perhitungan dan analisis yang dilakukan dapat dilakukan untuk satu fasa saja serta memperhitungkan fasa lainnya sepenuhnya seimbang dan hanya berbeda fasa 120 derajat saja.

Untuk memperoleh strategi pengendalian yang lebih akurat, sistem tiga fasa perlu diperhitungkan secara lengkap. Kesulitan yang akan ditemui adalah kalkulasi yang lebih rumit dan beban komputasi yang lebih berat. Penelitian ini mengambil fokus pengembangan piranti lunak untuk analisis aliran daya sistem tak setimbang dan optimisasi pengendalian daya reaktif/tegangan untuk meminimisasi susut daya dan perbaikan profil tegangan.

Dalam penelitian tahun pertama, perhitungan aliran beban akan dilakukan dengan mempertimbangkan kondisi beban tak seimbang dan memperhitungkan berbagai konfigurasi segmen saluran distribusi. Metode perhitungan aliran beban yang dipilih adalah Algoritma Propagasi Maju-Balik (*Forward-Backward Propagation Algorithm*). Dalam perhitungan ini, sistem tidak perlu dilakukan modifikasi terhadapnya dan juga tidak perlu dilakukan penerapan komponen simetris untuk memudahkan perhitungan. Perhitungan aliran beban dilakukan secara langsung

terhadap sistem dengan terlebih dahulu menentukan jalur penelusuran maju dan balik dan dilanjutkan dengan perhitungan arus jaringan dengan menggunakan jalur propagasi balik. Setelah nilai arus pada tiap segmen saluran diketahui, maka tegangan bus dapat diperhitungkan berdasarkan arus jarungan dan impedansinya. Nilai-nilai tegangan bus tersebut kembali digunakan untuk meng-*update* nilai arus segmen saluran. Perhitungan iteratif ini terus diulangi sampai dengan diperoleh selisih nilai tegangan tiap bus, tiap fasa untuk perhitungan iteratif yang berurutan. Selisih nilai tersebut diperiksa berdasarkan nilai toleransi yang ditetapkan dan perhitungan iteratif dikatakan konvergen jika nilai selisih dimaksud tidak melebihi toleransi yang ditetapkan.

Dalam penelitian tahun pertama, perhitungan aliran beban tiga-fasa tak seimbang diimplementasikan untuk sistem standar IEEE berdimensi 34 bus. Untuk keperluan investigasi perbaikan kondisi operasi sistem karena pemasangan kapasitor, maka dipasang kapasitor secara tentatif baik ukuran maupun lokasinya. Perhitungan aliran beban kembali dijalankan untuk melihat pengaruh pemasangan kapasitor shunt terhadap kondisi operasi sistem yang meliputi profil tegangan dan susut daya sistem. Tentu saja penentuan ukuran dan lokasi kapasitor masih perlu diperhitungkan secara lebih cermat dengan metoda optimisasi yang merupakan perhitungan terpisah.

Analisis aliran beban tiga fasa bukanlah satu-satunya perhitungan yang dilakukan dalam penelitian ini. Perhitungan tersebut memiliki peran utama memetakan (*mapping*) antara penambahan komponen kelistrikan dengan kondisi operasi sistem kelistrikan. Untuk keperluan perbaikan kondisi operasi sistem, sejumlah kapasitor *shunt* perlu dipasang pada sistem distribusi. Dalam kaitan ini, perhitungan aliran beban akan dilakukan secara berulang untuk beberapa kapasitor dengan ukuran yang bisa jadi berbeda yang dipasang untuk beberapa lokasi yang berbeda pula.

Dalam tahap penelitian tahun kedua ini, status operasional kapasitor shunt dan tap LTC dievaluasi setiap jam untuk merespon perubahan beban. Strategi pengendalian ini diperlukan untuk mempertahankan tingkat kompensasi optimal atas

beban kelistrikan yang berubah. Kurun pengendalian dilakukan untuk 24 jam, sehingga penentuan status operasional komponen tersakelar perlu dilakukan 24 kali untuk beban tiap jam. Perhitungan aliran beban perlu dijalankan beberapa kali untuk tiap jam dan akumulasi perhitungan tersebut untuk kurun 24 jam perhitungan menjadi cukup besar. Pemilihan Algoritma perhitungan aliran beban yang efisien dan akurat perlu dilakukan untuk meringankan beban komputasi.

Dalam penelitian tahun sebelumnya, program aliran beban telah berhasil dikembangkan dan akan dimanfaatkan dalam penelitian tahun kedua. Dalam penelitian tahun kedua ini, kombinasi-kombinasi status dan posisi tap LTC ditentukan secara optimal. Proses penentuan jadwal operasi optimal kapasitor-kapasitor tersebut dengan menggunakan metode optimisasi cerdas akan selalu melibatkan perhitungan aliran beban, sehingga program aliran beban merupakan tulang punggung (*backbone*) perhitungan dari seluruh proses optimisasi. Akurasi perhitungan aliran beban pada gilirannya akan memberikan kontribusi signifikan terhadap kesahihan (*ke-valid-an*) hasil optimisasi.

Dalam penelitian tahun kedua, penjadwalan operasi kapasitor *shunt* dan LTC akan ditentukan menggunakan metode optimisasi cerdas. Metode yang diusulkan adalah Algoritma Genetika (*Genetic Algorithm, GA*). Pemilihan Algoritma Genetika terutama didasarkan atas kemampuan algoritma tersebut untuk memperoleh hasil optimal global terutama untuk persoalan-persoalan optimisasi *multimodal*. Metode optimisasi ini akan lebih lanjut dikembangkan dengan menggabungkan metode Fuzzy kedalam Algoritma Genetika untuk membentuk metode Hibrida Fuzzy-Algoritma Genetika. Gabungan metode ini diharapkan memperbaiki hasil optimisasi penentuan status penjadwalan optimal kapasitor *shunt* dan LTC.

Dalam penelitian ini, dilakukan penentuan status penjadwalan optimal kapasitor *shunt* dan LTC sedemikian, sehingga diperoleh minimisasi susut daya dan perbaikan profil tegangan. Untuk keperluan tersebut berbagai kemungkinan solusi perlu dibangkitkan dan kandidat-kandidat solusi tersebut akan secara berkelanjutan diperbaiki dengan sebuah mekanisme seleksi yang mirip dengan seleksi alam (*natural*

selection). Program perhitungan aliran beban dimanfaatkan untuk mengevaluasi kombinasi status penjadwalan dengan memberikan hasil perhitungan yang berupa profil tegangan dan susut daya sistem. Untuk kombinasi tertentu perhitungan aliran beban akan melakukan perhitungan dan memberikan nilai susut daya dan deskripsi profil tegangan bagi kombinasi tersebut. Perhitungan tersebut dilakukan untuk seluruh kombinasi yang diberikan pada tiap jamnya. Setelah diselesaikan perhitungan untuk jam tertentu, perhitungan kembali dilakukan untuk jam berbeda dengan beban yang berbeda serta kombinasi penjadwalan yang berbeda pula. Perhitungan dilakukan untuk seluruh kurun optimisasi dengan jumlah kombinasi penjadwalan yang cukup besar.

Secara komputatif pelibatan program perhitungan aliran beban adalah sebagai subrutin pada perhitungan optimisasi Algoritma Genetika untuk mengevaluasi nilai susut daya dan profil tegangan atas kombinasi-kombinasi penjadwalan yang diberikan. Masukan untuk program tersebut adalah kombinasi penjadwalan dan keluarannya adalah nilai susut daya dan deskripsi profil tegangan atas beban sistem pada tahap tersebut. Terdapat sejumlah besar kandidat solusi yang perlu dievaluasi dan diperbaiki dalam proses komputasi. Sampai dengan tahap tertentu kandidat solusi dengan hasil terbaik akan diambil sebagai solusi akhir dari persoalan optimisasi yang ditangani. Hasil terakhir akan masih merupakan sandi-sandi genetik yang perlu diterjemahkan dalam bentuk hasil penjadwalan optimal yang dapat dipahami dan lebih operasional.

Jumlah tahapan maupun jumlah kandidat solusi pada umumnya ditentukan dengan mempertimbangkan hasil optimisasi dan beban komputasi. Solusi terbaik pada umumnya diperoleh dengan kandidat dalam jumlah besar dan generasi yang panjang. Namun beban komputasinya akan sangat berat. Dengan demikian, jumlah kandidat solusi dan generasi perlu ditentukan sedemikian, sehingga diperoleh solusi yang baik dengan beban komputasi yang masih dalam batas untuk dapat ditangani secara mudah.

Dalam penelitian tahun kedua ini setelah berhasil dikembangkan program penjadwalan optimal komponen tersakelar menggunakan Algoritma Genetika, algoritma akan lebih lanjut dikembangkan dengan memasukkan konsep logika kabur (*Fuzzy Logic*) kedalamnya. Diharapkan diperoleh hasil penjadwalan pengendalian yang lebih baik. Konsep Fuzzy tersebut dimanfaatkan untuk menentukan kombinasi yang lebih optimal dengan mempertimbangkan pemenuhan kekangan dan pencapaian sasaran yang lebih fleksibel. Perlu disampaikan di sini bahwa terdapat sejumlah fungsi sasaran dan kekangan yang perlu dipenuhi dan dicapai dalam proses optimisasi. Kombinasi pencapaian sasaran dan pemenuhan kekangan secara simultan akan lebih dapat dilakukan secara lebih baik dengan menerapkan pola relasi yang lebih lentur untuk kedua maksud tersebut. Dengan demikian, kandidat solusi potensial akan dievaluasi dengan mempertimbangkan secara mekanisme yang lebih fleksibel sedemikian, sehingga dimungkinkan eksplorasi yang lebih ekstensif atas kemungkinan solusi.