II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Aliran Daya Tiga Fasa

Menurut *Marsudi*, proses penyaluran tenaga listrik terdiri dari tiga komponen utama yaitu pembangkit, penghantar (saluran transmisi), dan beban. Pada sistem transmisi berfungsi untuk mentransfer energi listrik dari unit-unit pembangkit di berbagai lokasi ke sistem distribusi yang pada akhirnya menyuplai beban [1]. Saluran transmisi juga merupakan interkoneksi antar pembangkit tenaga listrik, dan memungkinkan tidak hanya mengirim daya yang ekonomis dalam satu wilayah saat kondisi normal tetapi juga transfer daya antar wilayah selama kondisi darurat.

1. Permasalahan Aliran Daya Tiga Fasa Sistem Tenaga

Terdapat banyak kasus terkait aliran daya tiga fasa pada sistem tenaga dimana ketidakseimbangan dalam proses penyaluran tenaga listrik tidak dapat diabaikan karena beban yang tidak seimbang, jalur transmisi yang tidak ditransposisi, dan kombinasi yang seimbang dengan jaringan tidak seimbang dalam sistem distribusi. Oleh karena itu, program aliran daya tiga fasa yang berhubungan dengan sistem daya yang tidak seimbang akan menjadi alat analisis yang berguna.

Menurut *Hasan Basri*, beban dari fasa banyak yang seimbang adalah beban dimana arus yang mengalir pada beban-beban simetris dan beban tersebut dihubungkan pada tegangan yang simetris pula. Dalam menganalisa beban seperti ini biasanya diasumsikan suplai oleh tegangan yang simetris pula, Dimana analisa dilakukan dalam tiap fasa saja. Dalam hal ini beban selalu diasumsikan seimbang pada tiap fasa, sedangkan pada kenyataannya beban-beban tersebut tidak seimbang [2]. Dalam hal ini penyelesaiannya menggunakan komponen simetris. Pada fasa tunggal dengan sistem tiga kawat beban seimbang bila arus yang mengalir pada kawat netralnya nol. Keadaan seperti ini hanya berlaku bila impendansi-impendansi yang menghubungkan fasa ke netralnya sama besar.

Elguera dan *Tavares* menyatakan bahwa sistem transmisi pada saat melakukan transfer energi listrik seharusnya tidak menimbulkan ketidakseimbangan [3]. Akan tetapi, jarak penghantar pada menara transmisi dapat menyebabkan ketidakseimbangan, disebabkan oleh jarak antar fasa dan antara fasa dengan tanah yang tidak sama, akibatnya akan menimbulkan ketidakseimbangan aliran daya. Jarak penghantar pada menara saluran transmisi tegangan tinggi yang tidak ditransposisi menghasilkan impedansi yang tak simetris, yang pada akhirnya menyebabkan tegangan dan arus pada ujung saluran tidak seimbang. Berbeda halnya dengan saluran transmisi tiga fasa takseimbang, yang disebabkan oleh saluran transmisi relatif panjang tetapi tidak ditransposisi dan atau beban yang tidak seimbang. Analisis sistem tenaga tiga fasa tidak dapat lagi diselesaikan dengan fasa tunggal, karena adanya perbedaan impedansi bersama antara fasa, akibatnya arus pada setiap fasa akan berbeda dan aliran daya pada masing-masing fasa juga berbeda.

Sedangkan dalam tulisannya *Birt* menyatakan bahwa ketidakseimbangan arus akan menimbulkan masalah yang serius, arus urutan negatif dapat menyebabkan pemanasan lebih pada mesin-mesin listrik sedangkan arus urutan nol dapat menyebabkan gangguan pada operasi relay proteksi [4]. Arus urutan nol yang besar akan menyebabkan pengaruh induktansi bersama antar saluran transmisi yang meningkat. Pada sistem distribusi tenaga listrik tiga fasa empat kawat tegangan rendah 220/380 Volt umumnya dipergunakan untuk memasok kelompok beban perumahan, gedung perkantoran, kawasan industri dan lainnya. Dalam kondisi operasi normal, sistem distribusi tenaga listrik mempunyai arus beban yang relatif seimbang dengan arus netral sistem yang sangat kecil, yakni tidak melebihi 20% dari arus normal. Beban dikatakan seimbang jika pada masing-masing fasa mengalir arus yang sama besarnya, namun pada kenyataannya selalu ada ketidakseimbangan sehingga arusnya pun tidak seimbang. Karena pemakaian atau pengoperasian beban tidak selalu pada waktu bersamaan pada sistem distribusi tiga fasa empat kawat, maka seringkali terjadi ketidakseimbangan pada fasa-fasanya. Akibatnya, timbul arus balik yang mengalir pada konduktor netral kesumber yang kita kenal dengan arus netral sistem menjadi sangat berlebihan dan bahkan melebihi arus fasanya meskipun arus fasa-fasanya seimbang. Arus netral ini merupakan penjumlahan vektor dari ketiga fasa arus dalam komponen simetris. Besarnya beban yang harus dilayani oleh pembangkit tidaklah konstan, melainkan selalu berubah sepanjang waktu tergantung kepada keperluan para pemakai tenaga listrik. Permintaan beban yang terjadi sewaktu-waktu harus ditanggapi oleh pusat-pusat pembangkit listrik untuk memproduksi tenaga listrik sesuai dengan kebutuhan. Penambahan beban tersebut menyebabkan besarnya beban pada

masing-masing fasa tidak sama besarnya (tidak seimbang). Mengingat bahwa perhitungan aliran daya merupakan *tool* penting pada perencanaan, operasi dan pengaturan sistem tenaga, maka berdasarkan uraian diatas menunjukkan pentingnya suatu studi aliran daya pada saluran transmisi tidak ditransposisi. Dimana seiring dengan perkembangan teknologi saat ini, maka sangatlah dirasakan akan kebutuhan energi listrik yang semakin meningkat. Tidak hanya kuantitasnya namun dalam kualitasnya haruslah memiliki keandalan yang tinggi. Sistem tenaga listrik yang handal adalah suatu sistem tenaga listrik yang dapat mengatasi semua gangguan yang muncul. Jika sistem tersebut tidak dapat mengatasi gangguan dengan baik maka akan mengganggu kontinuitas yang sering terkena gangguan. Hal ini disebabkan luas dan panjang kawat transmisi yang terpakai dan beroperasi pada kondisi yang berbeda-beda.

2. Gambaran Umum *Power Flow*

Aliran daya merupakan salah satu analisa sistem tenaga listrik pada keadaan *steady state*. Besaran yang dihasilkan dari perhitungan studi aliran daya adalah daya nyata (*real power*), daya reaktif (*reactive power*), tegangan *magnitude*, dan sudut fasa (*phase angle*) tegangan pada setiap rel. Jenis rel pada sistem tenaga, yaitu :

1. *Bus* Beban

   Setiap *bus* yang tidak memiliki generator disebut dengan *bus beban*. Pada *bus* ini daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) diketahui sehingga sering juga disebut *bus* PQ. Daya aktif dan reaktif yang dicatu ke dalam sistem tenaga adalah

mempunyai nilai positif, sementara daya aktif dan reaktif yang dikonsumsi bernilai negatif.

2. *Bus* Generator

Bus Generator dapat disebut dengan *voltage controlled bus* karena tegangan pada *bus* ini dibuat selalu konstan atau *bus* dimana terdapat generator. *Bus* ini sering juga disebut dengan PV *bus*. Besaran yang dapat dihitung dari *bus* ini adalah Q dan δ (sudut fasa di beban).

3. *Slack Bus*

Slack Bus sering juga disebut dengan *swing bus* atau *bus* berayun. Adapun besaran yang diketahui dari *bus* ini adalah tegangan (V) dan sudut beban (δ). Suatu sistem tenaga biasanya didesain memiliki *bus* ini yang dijadikan sebagai referensi yaitu besaran $\delta = 0^0$. Besaran yang dapat dihitung dari *bus* ini adalah daya aktif dan reaktif.

Tabel 2.1 Klasifikasi rel pada sistem tenaga

Jenis *Bus*	*Besaran yang diketahui*	*Besaran yang tidak diketahui*
Rel beban (PQ *bus*)	*P,Q*	*V, δ*
Rel Generator (PV *bus*)	*P,V*	*Q, δ*
Rel slack (swing *bus*)	*V, δ*	*P,Q*

B. Metode Penyelesaian yang Telah Digunakan

Menurut penelitian dari *Mamdouh Abdel Akher*, aliran daya merupakan pedoman penting dalam perencanaan sistem tenaga dan studi operasional. Terdapat banyak kasus dimana ketidakseimbangan sistem tidak dapat diabaikan karena ketidakseimbangan beban jaringan transmisi yang tidak ditrasnposisi, kombinasi seimbang dengan jaringan yang tidak seimbang pada sistem distribusi. Oleh karena itu, program aliran daya tiga fasa yang berhubungan dengan sistem daya yang tidak seimbang digunakan sebagai alat analisis [5].

Dalam penelitiannya juga memberikan formulasi dan solusi dari masalah aliran daya tiga fasa dengan menggunakan komponen urutan. Keuntungan dari penerapan komponen urutan bahwa ukuran masalah secara efektif berkurang dibandingkan dengan pendekatan komponen fasa. Dalam papernya juga diterapkan model komponen urutan *decouple* saluran transmisi, model transformator komponen urutan dan model jaringan transmisi komponen urutan *decouple* yang mengatasi kelemahan menggunakan komponen urutan dan pada saat yang sama mempertahankan keuntungan karena bisa dalam bentuk matriks ukuran yang lebih kecil yang menyebabkan penghematan besar dalam waktu dan memori, serta metode aliran daya urutan yang memanfaatkan SuperLU linear yang digunakan sebagai tujuan untuk solusi langsung dari sistem yang besar, jarang, dan persamaan linear non simetris.

Keakuratan metode aliran daya urutan yang diusulkan diuji dengan studi kasus yang berbeda dan dibandingkan dengan metode aliran daya kompensasi *decouple* dan metode *hybrid*. Kinerja metode yang diusulkan selanjutnya diperiksa

dibandingkan dengan koordinat fasa program *Newton-Raphson*. Metode *Fast Decoupled*, bila dibandingkan dengan urutan *Newton-Raphson*, adalah antara 20% -30% lebih cepat. Ini adalah penghematan yang rendah dibandingkan dengan aliran daya satu fasa, karena dalam aliran daya tiga fasa, urutan *Fast Decoupled* dan urutan *Newton-Raphson* harus memecahkan urutan negatif dan nol persamaan nodal tegangan yang sama. Sehingga hasil yang diperoleh dari tegangan *busbar* untuk kasus yang dipelajari berbeda adalah sama dengan yang diperoleh dari program aliran daya tiga fasa yang dikembangkan dalam komponen fasa.

Penelitian *Martín, Renato, Arturo,* dan *Roberto*, menyatakan bahwa sebuah studi numerik dari sistem yang tidak seimbang dan efek gangguan impedansi pada sistem analisis daya yang terganggu pada sistem jaringan distribusi. Terdapat dua metode yang berbeda untuk perhitungan gangguan yang digunakan hubungan singkat metode komponen simetris dan komponen fasa [6]. Sistem tenaga dapat memiliki operasi yang seimbang atau tidak seimbang. Sebuah sistem tenaga yang seimbang harus memenuhi persyaratan sebagai berikut, sumber tegangan tiga fasa yang seimbang, beban tiga fasa simetris, saluran tiga fasa ditransposisi, dan tiga fasa impedansi sendiri yang sama. Jika salah satu syarat tidak terpenuhi, sistem dianggap tidak seimbang. Hal ini sangat umum untuk mempertimbangkan sistem daya sebagai operasi pada kondisi seimbang. Dalam kondisi ini gangguan dihitung secara biasa melalui Metode Komponen Simetris. Namun, sistem distribusi yang menjadi bagian tidak seimbang karena karakteristik yang konstruktif dan operasional. Algoritma yang digunakan untuk menghitung arus gangguan dan tegangan harus sederhana, efisien dan memadai untuk kondisi sistem dan karakteristik gangguan. Metode komponen Simetris ini biasanya

digunakan untuk studi sistem yang seimbang, di mana kondisi tidak seimbang hanya merupakan gangguan. Di sisi lain, metode komponen fasa biasanya digunakan untuk studi sistem tidak seimbang. Metode komponen fasa ini lebih sulit untuk diterapkan daripada Metode Komponen Simetris. Oleh karena itu, dalam banyak aplikasi, Metode Komponen Simetris digunakan, tanpa kehilangan akurasi.

Fasa gangguan ke tanah pada sistem yang seimbang dihitung dengan menggunakan *Symmetrical Components Method*. *Phase Component Method* digunakan untuk menghitung fasa untuk gangguan dasar bagi sistem tidak seimbang. Hasil menunjukkan bahwa selama gangguan tegangan dan arus yang sangat dipengaruhi oleh ketidakseimbangan sistem dan gangguan impedansi. Peningkatan ketidakseimbangan sistem menyebabkan peningkatan selama gangguan tegangan dan variasi arus. Dari dua metode ini juga diimplementasikan dan dianalisis berdasarkan simulasi numerik dari IEEE uji 13 bus penyulang. Uji kasus meliputi efek ketidakseimbangan tegangan dan efek gangguan impedansi pada saat tegangan dan arus terganggu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa selama tegangan dan arus terganggu yang sangat besar dipengaruhi oleh ketidakseimbangan tegangan dan gangguan impedansi.

Dalam penelitian *Belkacem, Tarek,* dan *Kamel*, menyajikan pemodelan aliran daya tiga fasa yang digunakan sebagai sebuah alat untuk penempatan yang optimal dan pengendalian perangkat **FACTS** dalam sistem daya yang tidak seimbang[7]. Hasil yang diperoleh dari fasa tunggal sistem tenaga mungkin tidak realistis dan tidak bisa mampu mencirikan akurat masalah stabilitas tegangan

sistem tenaga yang tidak seimbang. Asimetri dalam jalur transmisi dan beban menghasilkan tingkat tertentu ketidakseimbangan dalam sistem daya yang sesungguhnya. Dengan kondisi tersebut, jumlah jatuh tegangan urutan negatif dan nol dapat diamati dalam jaringan listrik. Tingkat gangguan ini dianggap besar yang harus dikendalikan oleh standar kualitas daya untuk mempertahankan kompatibilitas elektromagnetik dari sistem. Dari sudut pandang ini, aliran beban tiga fasa memainkan peran penting sebagai perangkat lunak yang mampu melakukan penelitian propagasi dari komponen urutan negatif dan nol.

Dalam penelitiannya menjelaskan bahwa, metodologi global untuk tiga fasa analisis aliran beban dengan pemodelan fleksibel dari kompensator VAR statis disajikan untuk menemukan penempatan yang optimal dan kontrol perangkat FACTS dalam suatu sistem daya yang tidak seimbang. Dalam rangka untuk menilai dan menyelidiki pentingnya model tiga fasa aliran daya yang diusulkan, tiga fasa *model* SVC diimplementasikan untuk mengatur dan mengontrol daya reaktif disuntikkan atau diserap dalam ketidakseimbangan tiga fasa sistem daya. Hal ini sangat disarankan agar sebelum penempatan dan penerapan perangkat **FACTS** yang baru, pemodelan aliran beban tiga fasa dan studi dilakukan untuk menemukan kinerja terbaik dan pengaturan, dimana hasil dari penelitian numerik ini diuji pada sistem IEEE 5-Bus dan 30-Bus telah menunjukkan Pendekatan yang diusulkan adalah efektif.

J. B. V. Subrahmanyam, dalam makalahnya menyajikan metode algoritma komputer aliran beban tiga fasa sederhana dan efisien untuk memecahkan tiga fasa sistem distribusi radial yang tidak seimbang (RDS) [8]. Metode yang

diusulkan memiliki properti konvergensi yang baik untuk setiap jaringan distribusi praktis dengan rasio R/X praktis. Komputasi, metode ini sangat efisien, karena memecahkan persamaan sederhana rekursif aljabar untuk fasor tegangan dan semua data disimpan dalam bentuk vektor, sehingga menghemat sejumlah besar memori komputer. Algoritma yang diusulkan dapat digunakan secara efektif dengan *Supervisory Control And Data Acquisition* (SCADA) dan Otomasi Distribusi dan Pengendalian (DAC) sebagai algoritma dengan cepat mendapatkan solusi tegangan dan dapat digunakan untuk menyarankan *rerouting* atau rekonfigurasi jaringan untuk operasi yang efisien dari sistem.

Algoritma ini menggunakan prinsip-prinsip dasar dari teori rangkaian dan dapat dengan mudah dipahami. *mutual coupling* (efek kopling) antara fasa telah dimasukkan dalam model matematika. Algoritma yang diusulkan telah diuji dengan beberapa jaringan distribusi yang tidak seimbang dan hasil dari RDS seimbang disajikan dalam artikel. Penerapan metode yang diusulkan juga diperluas untuk menemukan penempatan optimal untuk kompensasi daya reaktif dan rekonfigurasi jaringan untuk perencanaan dan hari-hari operasi jaringan distribusi.

Berdasarkan *J.Kubokawa, Yue, Hiroshi, Takumi,* dan *Kimihiko*, dalam penelitian menjelaskan bahwa kemampuan transfer yang tersedia (ATC) adalah ukuran kemampuan sistem listrik interkoneksi untuk andal mentransfer daya dari satu daerah ke daerah lain melalui semua jalur transmisi atau jalur antara daerah-daerah di bawah kondisi sistem tertentu [9]. Di pasar saat ini *deregulasi*, itu adalah ukuran dari kemampuan jaringan untuk kegiatan komersial lebih lanjut atas

penggunaan sudah berkomitmen. Sampai saat ini, perhitungan ATC telah terutama difokuskan pada kondisi baik bagi kelangsungan hidup. Batas stabilitas tegangan juga telah dianggap. Namun, integrasi kendala stabilitas transien ke dalam perhitungan ATC masih merupakan perkembangan yang relatif baru. Terutama, beberapa OPF berbasis dinamis ATC algoritma tersedia meskipun mereka secara konseptual cukup baik. Tidak seperti kebanyakan metode pemrograman linear (LP) yang digunakan dalam ATC Static, metodologi berdasarkan metode *primal dual titik interior Newton* untuk masalah pemrograman nonlinier diperkenalkan untuk memecahkan masalah optimasi dinamis dibentuk ATC.

Dalam penelitiannya mengusulkan solusi Stabilitas Transient Dibatasi OPF dengan pertimbangan kesalahan tidak seimbang, di mana model tiga fasa transmisi dilaksanakan pada periode simulasi dinamis. Metode baru tersebut digunakan untuk mengintegrasikan kendala stabilitas transien ke masalah TTC disajikan. Kemudian, masalah TTC dinamis dengan tiga model fasor berhasil dirumuskan menggunakan metode TSCOPF. Metode yang diusulkan telah diimplementasikan dan diuji pada IEEJ WEST30 sistem model dengan kondisi beberapa gangguan yang seimbang. Dalam semua kasus, respon dinamik diperoleh hasil TTC diverifikasi oleh stabilitas sistem program CRIEPI banyak digunakan analisis daya dinamis.

C. Metode Aliran Daya Tiga Fasa yang Diusulkan

Aliran daya merupakan alat penting untuk analisis *steady state* dari setiap sistem listrik. Tujuan utama dari analisis aliran daya adalah untuk menghitung daya aktif (P) dan reaktif (Q) yang mengalir dalam setiap jaringan bersama

dengan sudut fasa (δ) dan magnitude tegangan (V) pada setiap bus sistem untuk kondisi pembebanan tertentu.

Dalam sistem tenaga listrik sering operasi yang dalam keadaan seimbang atau tidak seimbang. Sebuah sistem tenaga yang seimbang harus memenuhi persyaratan sebagai berikut, sumber tegangan tiga fasa yang seimbang, beban tiga fasa simetris, saluran tiga fasa ditransposisi dari jaringan transmisi tiga fasa untuk impedansi (induktansi) sendiri yang sama. Jika salah satu syarat tidak terpenuhi, sistem dianggap tidak seimbang. Hal ini sangat umum untuk mempertimbangkan sistem daya sebagai operasi pada kondisi seimbang. Dalam kondisi ini gangguan dihitung secara biasa melalui *Carson Method* dan Metode Komponen Simetris.

Metode yang digunakan sebagai alat utama untuk memecahkan masalah aliran daya tidak seimbang didasarkan pada jumlah fasa yang sebenarnya dengan semua peralatan yang relevan dimodelkan dalam koordinat fasa. Dengan demikian, pemecahan dari aliran daya untuk kasus tidak seimbang dan perlakuan khusus maka diperlukan untuk memecahkan jaringan aliran daya tiga fasa tak seimbang tersebut. Admitansi bersama di atas harus diubah menjadi representasi fasor. Untungnya, admitansi bersama akan muncul hanya dalam blok diagonal masuk sistem matriks Y (Wye).

Dalam penelitian ini mengembangkan metode yang digunakan untuk menganalisis aliran daya tiga fasa dengan membuat pemodelan dalam bentuk tiga busbar sistem tenaga. Dalam penerapannya dengan membuat algoritma aliran daya tiga fasa, dimana algoritma yang telah dibuat dimasukkan dalam bentuk program berupa Matlab 7.0.1. Metode aliran daya urutan yang diusulkan diuji

dengan studi kasus yang berbeda dan dibandingkan dengan hasilnya dengan program yang sudah ada, seperti Digsilent 14.0.520.