

Peningkatan *Available Transfer Capability* Menggunakan *Unified Power Flow Controller*

Adyatmoko W., Rony Seto Wibowo¹⁾, Adi Soeprijanto²⁾.

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: ronyseto@ee.its.ac.id

Abstrak— *Available Transfer Capability* (ATC) adalah kemampuan transfer yang masih mungkin bisa dilakukan pada sistem tenaga listrik. Pemasangan perangkat FACTS, yaitu *Unified Power Flow Controller* (UPFC) dilakukan untuk meningkatkan nilai ATC. UPFC akan mengontrol injeksi daya reaktif dan mengontrol tegangan pada saluran transmisi yang dipasang UPFC sehingga akan merubah aliran daya pada sistem tenaga listrik. Melalui analisis *optimal power flow* pada Sistem IEEE 14 bus, variabel-variabel kontrol akan diinjeksikan dari UPFC ke aliran daya Sistem IEEE 14 bus. Setelah dipasang UPFC sistem mampu mencapai nilai *load margin* maksimal pada 0,1511 ketika UPFC dipasang di Saluran 2-5, dengan ATC yang dicapai adalah 35,38 MW.

Kata Kunci— *Available Transfer Capability*, kemampuan transfer, *optimal power flow*, perangkat FACTS, *Unified Power Flow Controller*

I. PENDAHULUAN

UNTUK menghasilkan listrik dengan keandalan dan keamanan yang baik, salah satu hal utama yang perlu dikembangkan pada jaringan transmisi adalah peningkatan kemampuan jumlah transfer daya. Kemampuan transfer suatu jaringan dibatasi oleh karakteristik *electric* dan fisik dari sistem itu sendiri. Batasan-batasan itu antara lain :

Batas termal

Batas termal merupakan maksimum arus listrik yang mampu dilewatkan oleh saluran transmisi.

Batas Tegangan

Perubahan tegangan pada sistem harus dijaga pada *range* yang sesuai dengan batas minimum dan maksimum tegangan sehingga tidak menyebabkan kerusakan pada sistem atau fasilitas milik pelanggan.

Batas Kestabilan

Suatu jaringan transmisi harus mampu bertahan dari gangguan selama periode transient dan dinamik (*millisecond* sampai menit).

Suatu besaran yang menunjukkan kemampuan transfer daya adalah *Available Transfer Capability* (ATC). ATC menunjukkan jumlah transfer daya yang masih bisa ditingkatkan tanpa mengorbankan keamanan sistem. Bila daya listrik ditransfer dari satu lokasi (atau area) yang lain, seluruh jaringan transmisi merespon transaksi. Aliran daya pada sistem berubah tergantung pada banyak faktor seperti topologi jaringan, daya pembangkitan yang dikirim, tingkat permintaan pelanggan dan transaksi lainnya dalam jaringan [2].

II. AVAILABLE TRANSFER CAPABILITY (ATC)

ATC adalah kemampuan transfer yang masih mungkin bisa dilakukan pada sistem tenaga listrik tanpa mengorbankan keamanan sistem tersebut. Satuan ATC dalam transmisi tenaga listrik, umumnya dinyatakan dalam megawatt (MW). Pada [2], nilai ATC pada saluran dapat direpresentasikan dengan fungsi di bawah ini

$$ATC = TTC - Existing Transmission Commitments \quad (1)$$

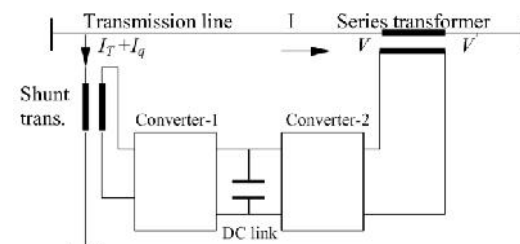
Di mana *TTC* (*Total Transfer Capability*) adalah besar daya listrik yang mampu dibangkitkan dan ditransfer melalui jaringan interkoneksi dalam keadaan yang handal. Sedangkan *Existing Transmission Commitments* merepresentasikan kondisi jaringan saat ini dan berapa daya yang ditransfer oleh jaringan dalam keadaan normal atau saat ATC ini dihitung [2].

Pada tugas akhir ini, permasalahan peningkatan ATC dilakukan dengan memaksimalkan *Load margin* (λ). Dengan memasang UPFC pada saluran, λ akan mampu ditingkatkan dan λ maksimal akan dapat dicapai. Adapun [3] menyatakan hubungan antara kondisi operasi kritis dengan kondisi operasi normal sebagai berikut

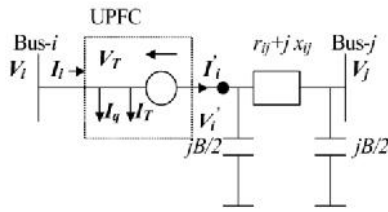
$$\begin{aligned} P_{gi}^* &= (1 + \lambda + K_g) P_{gi} & ; & \quad Q_{gi}^* = (1 + \lambda) Q_{gi} \\ P_{di}^* &= (1 + \lambda) P_{di} & ; & \quad Q_{di}^* = (1 + \lambda) Q_{di} \end{aligned} \quad (2)$$

di mana

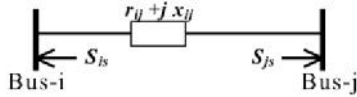
- P_{gi}^* : pembangkitan daya aktif di bus i kondisi kritis;
- Q_{gi}^* : pembangkitan daya reaktif di bus i kondisi kritis;
- P_{di}^* : beban daya aktif di bus i saat kondisi kritis;
- Q_{di}^* : beban daya reaktif di bus i saat kondisi kritis;
- P_{gi} : pembangkitan daya aktif di bus i kondisi normal;
- Q_{gi} : pembangkitan daya reaktif di bus i kondisi normal;
- P_{di} : beban daya aktif di bus i saat kondisi normal;
- Q_{di} : beban daya reaktif di bus i saat kondisi normal;



Gambar 1. Skema UPFC [1]



Gambar 2. Model UPFC pada Saluran Transmisi [1]



Gambar 3. Model Injeksi Daya UPFC [1]

III. UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER (UPFC)

A. Konsep Dasar UPFC

UPFC merupakan salah satu peralatan kontrol FACTS yang paling kompleks dan komprehensif karena dapat mengontrol ketiga parameter yang mempengaruhi aliran daya pada saluran transmisi listrik, yaitu impedansi saluran, besar tegangan transmisi dan perbedaan sudut fasa antara tegangan pada sisi kirim dan tegangan pada sisi terima. UPFC terdiri atas dua Voltage Source Inverter (VSI) atau konverter dimana satu konverter terhubung secara shunt dengan sistem transmisi melalui transformator shunt, sedangkan konverter yang lain terhubung secara seri melalui transformator seri. Konverter 1 berfungsi untuk menyediakan daya aktif yang dibutuhkan oleh konverter 2 pada dc link capacitor dari sistem. Konverter 1 juga menginjeksi atau menyerap daya reaktif ke saluran. Sedangkan konverter 2 berguna sebagai sumber tegangan pada frekuensi fundamental dengan variabel magnitude ($0 \leq V_T \leq V_{T,max}$) dan sudut fasa ($0 \leq \phi_T \leq \pi_T$). Sumber tegangan ini dapat menginjeksi atau menyerap daya reaktif yang dibutuhkan pada dc link capacitor [1]. Secara umum skema UPFC pada dapat dilihat pada Gambar 1.

B. Pemodelan UPFC

Model UPFC yang dipasang pada saluran transmisi dapat dilihat pada Gambar 2. Berdasarkan [1], hubungan dari ketiga variabel control dapat dijelaskan sebagai berikut

$$\begin{aligned} V'_i &= V_i + V_T, \quad \text{Arg}(I_q) = \text{Arg}(V_i) \pm \pi/2 \\ \text{Arg}(I_T) &= \text{Arg}(V_i) \quad \text{and} \quad I_T = \frac{\text{Re}[V_T I_i^{*bc}]}{V_i} \end{aligned} \quad (3)$$

Pada Gambar 3 digambarkan model injeksi daya UPFC di mana daya S diinjeksi ke bus-i dan juga ke bus-j. Daya aktif dan reaktif yang diinjeksikan oleh UPFC ke bus-i dan bus-j berdasarkan [1] dapat dinyatakan sebagai berikut

$$\begin{aligned} P_{is} &= -V_T^2 g_{ij} - 2V_i V_T g_{ij} \cos(\phi_T - \delta_i) \\ &+ V_j V_T [g_{ij} \cos(\phi_T - \delta_j) + b_{ij} \sin(\phi_T - \delta_j)] \end{aligned} \quad (4)$$

$$P_{js} = V_j V_T [g_{ij} \cos(\phi_T - \delta_j) - b_{ij} \sin(\phi_T - \delta_j)] \quad (5)$$

$$Q_{is} = V_i I_q + V_i V_T [g_{ij} \sin(\phi_T - \delta_i) + (b_{ij} + B/2) \cos(\phi_T - \delta_i)] \quad (6)$$

$$Q_{js} = -V_j V_T [g_{ij} \sin(\phi_T - \delta_j) + b_{ij} \cos(\phi_T - \delta_j)] \quad (7)$$

IV. OPTIMAL POWER FLOW (OPF)

Pada tugas akhir ini, akan digunakan dua jenis OPF yaitu OPF untuk meminimalkan biaya operasi yang menjadi *base case* dan OPF untuk peningkatan ATC.

A. OPF Untuk Meminimalkan Biaya Operasi [3]

Secara umum merupakan bentuk OPF untuk menyelesaikan permasalahan economic dispatch, yaitu meminimalkan biaya pembangkitan dengan cara seperti berikut

Fungsi Objektif

$$\text{Min } GC = \sum_{i \in G} C_i(P_{Gi}) = \sum_{i \in G} (c_2 P_{Gi}^2 + c_1 P_{Gi} + c_0) \quad (8)$$

Batasan Persamaan

Persamaan power balance :

$$P_{Gm} - P_{Dm} = V_m \sum_{n=1}^{NB} V_n (G_{mn} \cos(\theta_m - \theta_n) + B_{mn} \sin(\theta_m - \theta_n))$$

$$Q_{Gm} - Q_{Dm} = V_m \sum_{n=1}^{NB} V_n (G_{mn} \sin(\theta_m - \theta_n) + B_{mn} \cos(\theta_m - \theta_n)) \quad (9)$$

Batasan Pertidaksamaan

Batasan kapasitas pembangkit :

$$P_{Gi,min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,max} \quad ; \quad Q_{Gi,min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi,max} \quad (10)$$

Batasan Tegangan :

$$V_{m,min} \leq V_m \leq V_{m,max} \quad (11)$$

Batasan termal transmisi :

$$S_l \leq S_{l,max} \quad (12)$$

di mana:

- GC : total biaya pembangkitan
- c_2, c_1, c_0 : koefisien biaya pembangkitan
- C_i : biaya pembangkitan unit i
- G_{mn}, B_{mn} : admitansi saluran m-n
- V_m : magnitude tegangan bus m
- θ_m, θ_n : sudut fasa tegangan bus m dan bus n
- P_{Gi} : besar pembangkitan daya aktif bus i
- Q_{Gi} : besar pembangkitan daya reaktif bus i
- P_{Di} : beban daya aktif bus i
- Q_{Di} : beban daya reaktif bus i
- S_l : aliran daya saluran l

B. OPF dengan UPFC untuk peningkatan ATC [1]

Seperi telah dijelaskan di bagian sebelumnya bahwa pada tugas akhir ini peningkatan ATC dilakukan dengan memaksimalkan Load margin (λ). Sehingga terdapat dua kondisi operasi sistem, yaitu normal operasi dan kondisi kritis operasi.

Fungsi Objektif

$$\max \lambda$$

Batasan untuk kondisi operasi beban normal [1]

Batasan Persamaan

Berisi persamaan-persamaan power balance dari tiap bus. Untuk bus yang terpasang UPFC, persamaannya sebagai berikut

$$P_i = \sum_{m=1}^{Nb} V_i V_m [G_{im} \cos(\delta_i - \delta_m) + B_{im} \sin(\delta_i - \delta_m)] - P_{is}$$

$$Q_i = \sum_{m=1}^{Nb} V_i V_m [G_{im} \sin(\delta_i - \delta_m) - B_{im} \cos(\delta_i - \delta_m)] - Q_{is} \quad (14)$$

di mana

- P_i : injeksi daya aktif di bus i;
- Q_i : injeksi daya reaktif di bus i;
- V_i : magnitudo tegangan di bus i;
- δ_i : sudut fasa di bus i;
- Y_{ij} : $G_{ij} + jB_{ij}$ = elemen ke i-j dari Y-bus matriks;
- P_{is} : injeksi daya aktif UPFC ke bus i;
- Q_{is} : injeksi daya reaktif UPFC ke bus i;

Batasan Pertidaksamaan

Batasan kapasitas pembangkit :

$$P_{gi}^{min} \leq P_{gi} \leq P_{gi}^{max} \quad i = 1,2,3,\dots,N_g$$

$$Q_{gi}^{min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi}^{max}, \quad i = 1,2,3,\dots,N_g \quad (16)$$

Batasan tegangan :

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max}, \quad i = 1,2,3,\dots,N_g \quad (17)$$

Batasan termal transmisi :

$$S_l \leq S_{l,max} \quad (18)$$

Batasan variabel kontrol UPFC :

$$0 \leq V_T \leq V_T^{max} \quad (19)$$

$$0 \leq \theta_T \leq 2\pi \quad (20)$$

$$I_q^{min} \leq I_q \leq I_q^{max} \quad (21)$$

Batasan untuk kondisi operasi beban kritis [3]

Batasan Persamaan

Berisi persamaan-persamaan power balance dari tiap bus. Untuk bus yang terpasang UPFC, persamaannya sebagai berikut

$$P_i^* = \sum_{m=1}^{Nb} V_i^* V_m^* [G_{im} \cos(\delta_i^* - \delta_m^*) + B_{im} \sin(\delta_i^* - \delta_m^*)] - P_{is}^*$$

$$Q_i^* = \sum_{m=1}^{Nb} V_i^* V_m^* [G_{im} \sin(\delta_i^* - \delta_m^*) - B_{im} \cos(\delta_i^* - \delta_m^*)] - Q_{is}^* \quad (22)$$

Daya yang diinjeksikan oleh UPFC ke bus-i dan bus-j

$$P_{is}^* = -V_T^{*2} g_{ij} - 2V_i^* V_T^* g_{ij} \cos(\phi_T^* - \delta_i^*) + V_j^* V_T^* [g_{ij} \cos(\phi_T^* - \delta_j^*) + b_{ij} \sin(\phi_T^* - \delta_j^*)] \quad (23)$$

$$P_{js}^* = V_j^* V_T^* [g_{ij} \cos(\phi_T^* - \delta_j^*) - b_{ij} \sin(\phi_T^* - \delta_j^*)] \quad (24)$$

$$Q_{js}^* = V_i^* I_q^* + V_i^* V_T^* [g_{ij} \sin(\phi_T^* - \delta_i^*) + (b_{ij} + B/2) \cos(\phi_T^* - \delta_i^*)] \quad (25)$$

$$Q_{is}^* = -V_j^* V_T^* [g_{ij} \sin(\phi_T^* - \delta_j^*) + b_{ij} \cos(\phi_T^* - \delta_j^*)] \quad (26)$$

Batasan Pertidaksamaan

Batasan kapasitas pembangkit :

$$P_{gi}^{min} \leq P_{gi}^* \leq P_{gi}^{max}, \quad i = 1,2,3,\dots,N_g$$

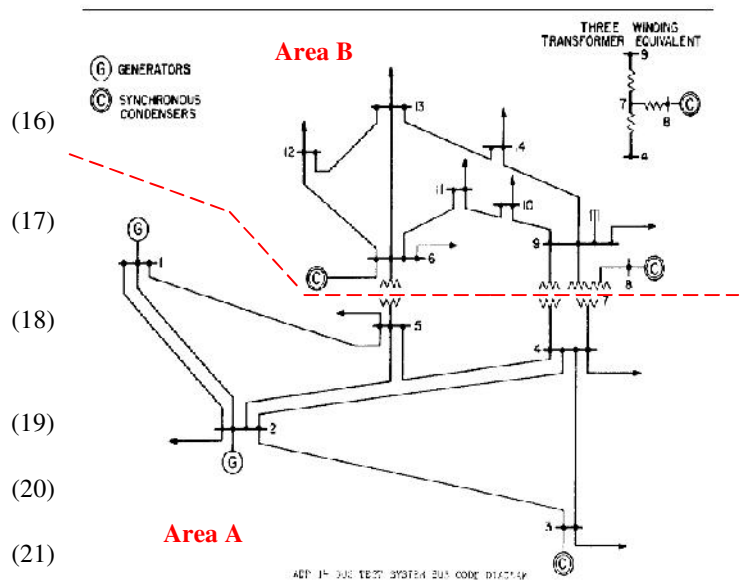
$$Q_{gi}^{min} \leq Q_{gi}^* \leq Q_{gi}^{max}, \quad i = 1,2,3,\dots,N_g \quad (28)$$

Batasan tegangan :

$$V_i^{min} \leq V_i^* \leq V_i^{max}, \quad i = 1,2,3,\dots,N_g \quad (29)$$

Batasan termal transmisi :

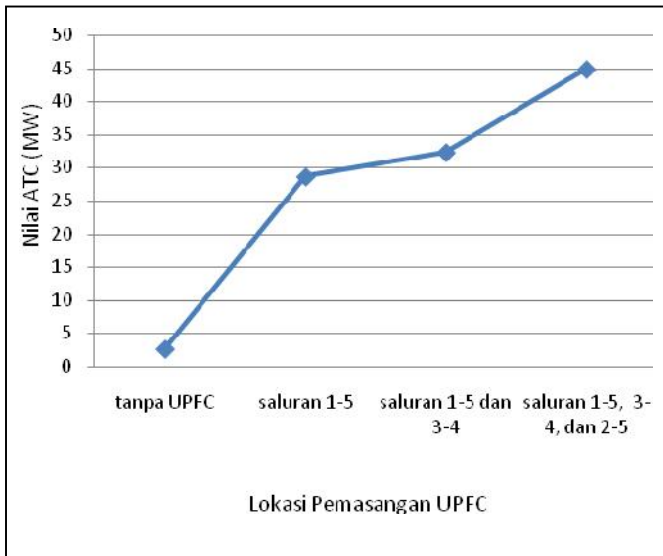
$$S_l^* \leq S_{l,max} \quad (30)$$



Gambar 4 Single Line Diagram Standar IEEE 14 bus

Tabel 1 Nilai Available Transfer Capability (ATC)

Kasus	Lokasi UPFC	Total Transfer Kondisi Kritis	Total Transfer Kondisi Base Case	ATC (MW)
1	-	28.59	25.96	2.63
2	saluran 25	61.34	25.96	35.38
3	saluran 25	62.98	25.96	37.02
	saluran 34			
4	saluran 15	70.85	25.96	44.89
	saluran 25			
	saluran 34			



Gambar 5 Nilai ATC terhadap jumlah perangkat UPFC

V. SIMULASI DAN ANALISIS

Sistem yang digunakan pada Tugas Akhir ini adalah sistem standar IEEE 14 bus seperti yang ditunjukkan Gambar 4. Pada tugas akhir ini, sistem IEEE 14 bus di atas akan dibagi menjadi dua area yang masing-masing disebut sebagai area A dan area B.

Tabel 1 menunjukkan jumlah kemampuan transfer dan aliran daya pada koridor transfer yang bersangkutan saat kondisi kritis. Koridor transfer yang dimaksud adalah Saluran 5-6, 4-7, dan 4-9. Untuk kasus dengan pemasangan 1 UPFC, kemampuan transfer yang paling maksimum saat kondisi kritis dapat tercapai saat UPFC terpasang di Saluran 2-5, yaitu dengan total 61,34 MW.

Selain itu, Tabel 1 menunjukkan bahwa ada selisih yang signifikan antara total transfer saat beban kondisi kritis dengan saat kondisi normal. Selisih ini yang kemudian disebut dengan *Available Transfer Capability* (ATC).

Berdasarkan Tabel 1, didapatkan

$$ATC = \text{Total Transfer Kondisi Kritis} - \text{Total Transfer Kondisi Normal}$$

Setelah sistem dipasang UPFC, besar ATC berbeda tergantung lokasi pemasangannya. Untuk kasus dengan pemasangan 1 UPFC, ATC paling maksimum dicapai saat UPFC dipasang di Saluran 2-5 yaitu sebesar 35,38 MW. Gambar 5 menunjukkan nilai ATC meningkat sebanding dengan jumlah UPFC yang dipasang. Hal tersebut menunjukkan kemampuan sistem memenuhi kenaikan beban sesuai dengan kenaikan nilai load margin (λ) yang ditunjukkan oleh Tabel 2. Tabel 2 menunjukkan hubungan antara peningkatan load margin dengan peningkatan ATC.

Berdasarkan Tabel 2 juga ditunjukkan ketiga nilai variabel yang diinjeksikan oleh UPFC. Nilai V_t yang diinjeksikan rata-rata berkisar di 0,3 pu. Nilai Phit maksimum sebesar 1,9871 deg dan Phit minimum 0 deg. Sedangkan nilai I_q di semua lokasi pemasangan UPFC bernilai 0. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem tidak membutuhkan injeksi daya reaktif untuk meningkatkan ATC.

Tabel 2 Nilai Variabel Injeksi UPFC

Kasus	Lokasi UPFC	V_t (pu)	Phit (deg)	I_q (pu)	ATC (MW)	λ
3	saluran 25	0.294	1.4603	0	35.38	0.1511
7	saluran 25	0.3	0.488	0	37.02	0.1583
	saluran 34	0	0.8057	0		
8	saluran 15	0.0662	0.4831	0	44.89	0.1584
	saluran 25	0.297	0.7518	0		
	saluran 34	0.02	0.0666	0		

dengan

V_t : Magnitude tegangan injeksi konverter seri UPFC

Phit : Sudut fasa tegangan injeksi konverter seri UPFC

I_q : Arus injeksi dari konverter paralel

VI. KESIMPULAN

Dari simulasi dan analisis yang telah dilakukan pada Tugas Akhir ini, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. ATC akan mengalami peningkatan seiring dengan peningkatan load margin setelah sistem dipasang UPFC.
2. Semakin banyak jumlah UPFC terpasang, maka semakin meningkat juga nilai ATC.
3. Pemasangan UPFC paling optimal ketika dipasang di Saluran 2-5, dengan nilai ATC mencapai 35,38 MW. Nilai variabel kontrol dari perangkat UPFC untuk mencapai kondisi tersebut yaitu tegangan injeksi dari konverter seri sebesar 0,294 pu dengan sudut 1,46 deg, serta injeksi arus dari konverter shunt bernilai 0.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Verma, K.S, Gupta H.O, "Impact on Real and Reactive Power Pricing in Open Power Market Using Unified Power Flow Controller", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.21, No. 1, (2006).
- [2] Manikandan, B.V., S. Charles Raja, P. Venkatesh, "Multi Area Available Transfer Capability Determination in Restructured Electricity Market", IEEE, (2008).
- [3] Wibowo, R.S., Naoto Yorino, Mehdi Eghbal, Yoshifumi Zoka, Yutaka Sasaki, "FACTS Devices Allocation With Control Coordination Considering Congestion Relief and Voltage Stability", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 26, No. 4, (2011).