

FACTS적용계통에서의 송전용량 평가 알고리즘

*윤용범, 윤종수, 추진부
한전전력연구원 차세대전력전송그룹

An Algorithm for Transfer Capability Evaluation in Power Systems with FACTS Device

*Yong-Beum Yoon, Jong-Su Yoon, Jin-Boo Choo
KEPRI FACTS & Protection Group

Abstract - In this paper, sensitivity based approach to estimate BITC(bilateral interchange transfer capacity) considering the real power flow control function of FACTS device is presented. The real power flow setting of the FACTS device is adjusted so that it transfer the power flow from the first violation point of transmission capacity to other transmission lines in the power system, thus allowing more power to be transferred from the specified generator bus to the specified load bus. The transfer between the two bus locations is increased from this new operating condition until a violation of transmission capacity limits occurs or until the setting of the FACTS device can no longer be adjusted. The proposed algorithm is illustrated using examples of small and real life power system.

1. 서 론

전력전자 기술의 급속한 발전으로 인하여 새로이 개발된 FACTS 기술은 새로운 송전선로 건설을 수반하지 않으면서 기존 전력계통의 운용능력을 한계까지 확장할 수 있다는 점[1]에서 많은 관심을 불러 일으키고 있다. 이와 관련, FACTS기기를 전력계통 특성에 적합하도록 구현코자 하는 많은 연구가 국내외적으로 활발히 이루어져 [2-3] 실제 적용결과들도 일부 발표되고 있는 단계이다[3,4]. 이와 같이 연구사례들은 크게 두가지로 구분할 수 있는데, 첫째는 FACTS기기에 의하여 전력계통 안정도를 향상시켜 안전운전 영역을 확대함으로써 새로운 송전설비의 투자비용 대체효과를 가져오는 것이고 둘째는 전력거래 수단으로서의 전력제어에 관한 것이다. 전, 후자는 전력계통 상호 밀접한 관계를 가지며 특히 후자에 있어서는 전자의 전력계통에 대한 안정도 분석외에도 외부계통 혹은 독립발전사업자로부터 얼마만한 전력에너지 교환이 가능한지에 관한 송전용량 평가가 필수적이다. 본 논문에서는 두지점(발전지점과 부하지점)간 송전용량을 감도해석에 의하여 평가하는 알고리즘과 함께 FACTS에 의한 증대효과 평가 알고리즘을 제안하였다.

2. 송전용량 평가문제의 정식화

2.1 송전용량의 정의

본 논문에서 다루는 문제는 FACTS기기가 없는 계통에서의 두지점, 즉 발전기 모선과 부하모선사이의 최대 송전용량을 평가함과 동시에 특정선로에 FACTS기기를 설치, 전력조류를 제어함에 의하여 부가적으로 증대가능한 송전용량을 평가하는 것으로 한다. 일반적으로 송전용량을 4개부류[4]로 구분하고 있는데 본 논문에서는 두지점간 송전용량, 즉 BITC(Bilateral Interchange Transfer Capacity)를 대상으로 한다. BITC는 계통 안전운전 영역내에서 특정 발전지점 i 모선으로부터 특정 부하지점

j 모선까지 송전할 수 있는 최대 유효전력량으로 정의되며 이를 수식으로 표현하면 식(1)과 같다.

$$BITC_{ij} = \underset{s}{\text{Max}} \Delta P_j \quad (1)$$

단, $\Delta P_k = 0 ; k \neq i, j,$

$\Delta P_j = -\Delta P_i, \quad s : \text{계통 안전운전 영역}$

$\Delta P_i : i \text{ 모선에서의 발전 증가량}$

$\Delta P_j : j \text{ 모선에서의 부하 증가량}$

2.2 계통 안전운전 영역의 표현

본 논문에서는 오프라인의 과도안정도 및 미소신호 안정도 해석을 통하여 선로별 한계조류는 정해져 있다고 가정한다. 이와같은 같은 선로별 송전용량을 만족하는 운전상태의 집합을 안전영역 S_{ij} 로 정의하며 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{ij} = \{ |P_{m-n}| \leq P_{m-n}^{\text{lim}}, \text{ 모든 } m-n \text{에 대하여} \} \quad (2)$$

단, $P_{m-n}(P_{m-n}^{\text{lim}}) : m, n \text{ 모선사이의 선로를 통하여 흐르는 유효전력량(한계유효전력량)}$

그런데, 선로별 유효전력조류는 식(3)과 같이 나타낼 수 있으며

$$P_{m-n} = \frac{|V_m||V_n|}{Z_{m-n}} \sin \theta_{m-n} \quad (3)$$

각 모선 전압크기를 1.0이라 가정하고 선로임피던스를 $Z_{m-n} \approx jX_{m-n}$ 로 간략화하여 식(2)에 대입하면 안전영역 S_{ij} 는 식(4)와 같이 모선간의 위상차에 관한 안전영역 S_{θ} 로 표현할 수 있다.

$$S_{\theta} = \{ \theta_{m-n}^{\text{min}} \leq \theta_{m-n} \leq \theta_{m-n}^{\text{max}}, \text{ 모든 } m-n \text{에 대하여} \} \quad (4)$$

2.3 문제의 정식화

식(4)로 주어진 안전영역에서 i, j 모선사이 부가적으로 증가시킬 수 있는 유효전력량 $BITC_{ij}$ 는 모선간의 위상차 θ_{m-n} 함수가 되며, k, l 모선사이 설치된 FACTS기기에 의한 조류제어기능까지도 포함하여 송전용량 평가문제를 정식화하면 식(5)와 같다.

$$\underset{k-l}{\text{Max}} BITC_{ij} \quad (5)$$

$$\text{단, } \theta_{m-n}^{\min} \leq \theta_{m-n}^0 + \frac{\partial \theta_{m-n}}{\partial P_{ij}} \Delta P_{ij} + \frac{\partial \theta_{m-n}}{\partial P_{k-l}} \Delta P_{k-l} \leq \theta_{m-n}^{\max},$$

모든 $m-n$ 에 대하여

3. FACTS를 고려한 BITC평가 알고리즘

3.1 이상적 FACTS기기의 모델 도입

이상적인 FACTS기기라 함은 송전선로에 흐르는 유, 무효전력을 결정하는 네 개의 변수, 즉 송전 유, 무효전력과 수전 유, 무효전력을 전력계통 운전상태에 관계없이 독립적으로 제어 가능한 기기를 의미한다. 송전손실이 없고 FACTS기기에 에너지 저장기능이 없다고 가정하면 송,수전전력은 동일 ($P_s = P_r = P$)하게 되며 이는 그림(1)과 같이 모델링 된다. 그런데 분할된 $P-\delta$ 조류계산 모델에서는 유효전력만을 고려하므로 그림(1.a)의 이상적 FACTS 기기모델에서 유효전력에 관한 기능, 즉 선로에 흐르는 유효전력은 전력계통의 운전상태에 관계없이 독립적으로 제어가능하다는 것으로 가정한다. 이는 곧 일단 FACTS기기에 의하여 선로조류를 일정치 (F)에 설정하면 계통운전상태가 변화여도 그 선로에 흐르는 조류 F 는 일정함을 의미한다. 이를 등가적으로 표현하면 그림(1.b)와 같이 나타낼 수 있는데 FACTS기기가 설치된 선로를 제거하고 그 대신, 송전측 모션에는 F 의 발전력이 수전측 모션에는 F 의 부하가 연결된 계통으로 모델링된다.

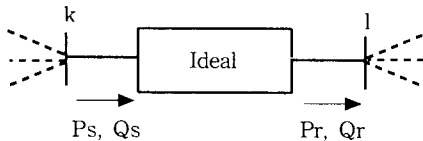


그림 1a) 에너지원을 갖지않는 이상적 FACTS기기의 운전 개념도

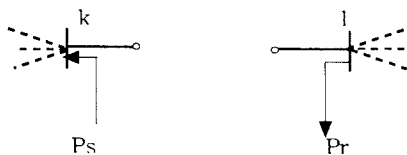


그림 1b) 송전용량 평가에서의 이상적 FACTS기기 모델

3.2 모션 위상각 감도에 위한 BITC 평가

전력조류계산식을 자코비안에 의하여 나타내면 식(6)과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{inj} \\ \Delta Q_{inj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{p\theta} & J_{pv} \\ J_{q\theta} & J_{qv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_{bus} \\ \Delta V_{bus} \end{bmatrix} \quad (6)$$

식(6)에서 유효전력 및 위상각 변화에 관한 성분만을 이용하여 각 모션에 주입되는 유효전력 변화분에 따른 모션위상각 변화를 표현하면 식(7)로 표현된다.

$$[\Delta \theta_{bus}] = [J_{p\theta}]^{-1} [\Delta P_{inj}] \quad (7)$$

i 발전모션과 j 부하모션사이의 BITC, 즉 $BITC_{ij}$ 를 평가하는 경우, i 모션에서의 발전력 증가와 함께 j 모

션에서의 부하증가에 따른 선로별 모션위상차는 식(8)와 같이 나타낼 수 있는데 $[\Delta \theta_{bus}]$ 는 식(7)에 i 번째열이 1, j 번째 열이 -1, 그리고 나머지 요소는 모두 영)로 주어지는 $[\Delta P_{inj}] = [0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0, -1, 0, \dots, 0]^T$ 을 대입하여 얻어진다.

$$[S_{ij}] = [A]^T [\Delta \theta_{bus}] \quad (8)$$

단, $[S_{ij}]$: i 모션이 발전과 j 모션의 부하를 단위만큼 변화시켰을 때 모션위상차 감도 ($nl \times 1$)

$[A]$: 계통 Incidence행렬 ($nb \times nl$)

식(8)에서 m, n 모션사이의 위상차 감도를 S_{ij}^{m-n} 라 하면 각 선로의 위상차 제약을 고려한 $BITC_{ij}$ 는 식(9)로부터 계산 된다.

$$\Delta P_{ij}^{m-n} = \begin{cases} \frac{\theta_{m-n}^{\min} - \theta_{m-n}^0}{S_{ij}^{m-n}} & \text{if } S_{ij}^{m-n} < 0 \\ +\infty & \text{if } S_{ij}^{m-n} = 0 \\ \frac{\theta_{m-n}^{\max} - \theta_{m-n}^0}{S_{ij}^{m-n}} & \text{if } S_{ij}^{m-n} > 0 \end{cases} \quad (9)$$

여기서, ΔP_{ij}^{m-n} 는 m, n 모션사이의 위상차에 관한 제약 조건을 만족하면서 i 모션에서 j 모션으로 부가적으로 송전할 수 있는 최대유효전력량을 나타낸다. 따라서 모든 제약조건을 만족하는 $BITC_{ij}$ 는 식(10)으로부터 결정된다.

$$BITC_{ij} = \text{Min}(\Delta P_{ij}^{m-n}, \text{ 모든 } m-n \text{에 대하여}) \quad (10)$$

상기식들에 의하여 $BITC$ 를 평가하게되며 세부 알고리즘은 그림2와 같다.

3.3 FACTS기기의 전력조류 제어효과를 고려한 BITC 평가 알고리즘

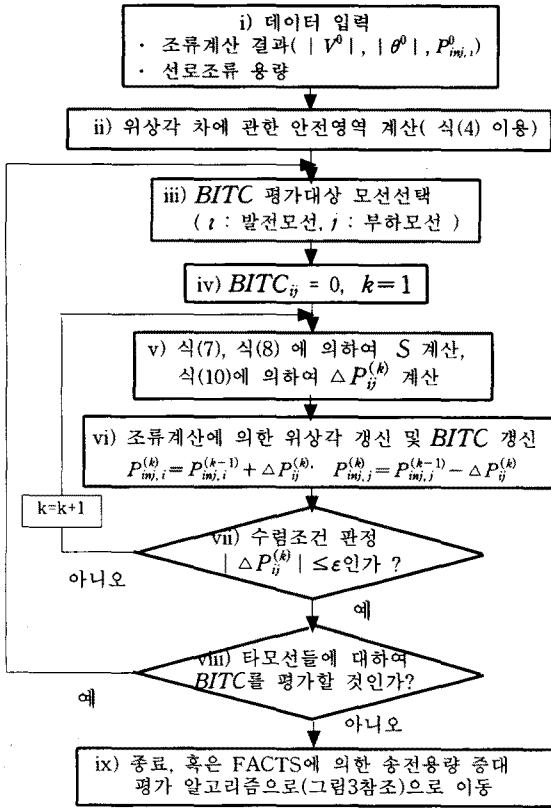
그림2의 알고리즘에 의하여 FACTS기기가 없는 계통에서의 모션간 BITC 및 병목선로를 찾을 수 있게 된다. 이때 임의의 k, l 모션사이 선로에 FACTS기기를 설치함으로써 인하여 병목선로에서의 전력조류 제약을 극복하고 얼마만큼의 $BITC_{ij}$ 를 더 증가시킬 수 있는가 하는 문제는 k, l 모션사이에 설치된 FACTS를 그림1.b와 같이 등가화한 계통에서의 $BITC$ 를 평가하는 것과 동일하게 된다. FACTS에 의하여 k, l 모션사이에 일정하게 흐르도록 제어되는 전력조류를* P_s 라 하면 FACTS가 고려된 계통에서의 모션주입전력은 식(11)과 같이 주어지며 Incidence행렬은 식(8)의 Incidence행렬에서 k, l 모션사이의 선로에 해당되는 열을 제외한 행렬로 주어진다.

$$\begin{aligned} P_{inj,l}^{FACTS} &= P_{inj,l}^{NO FACTS} - P_s \\ P_{inj,k}^{FACTS} &= P_{inj,k}^{NO FACTS} + P_s \end{aligned} \quad (11)$$

$$P_{inj,m}^{FACTS} = P_{inj,m}^{NO FACTS}$$

단, $m \neq k, l$

그림 2 모션위상각 감도에 의한 BITC 평가 흐름도



이후의 각 선로 위상차 제약에 의한 $BITC_{ij}^{FACTS}$ 결정은 앞의 식(9), (10)이용과정과 동일하며 세부 BITC 평가 알고리즘을 그림3에 도시하였다.

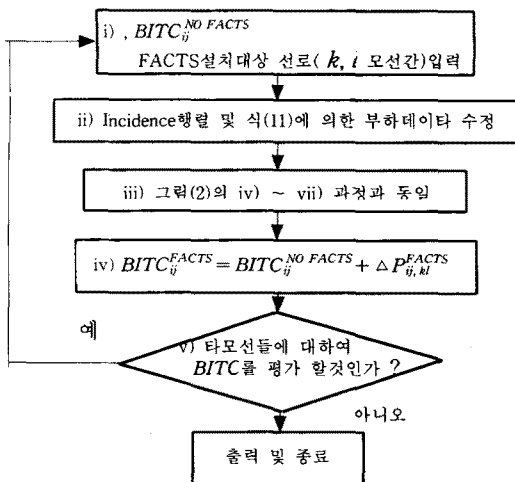


그림 3 FACTS의 전력조류 제어특성을 고려한 BITC 평가 흐름도

4. 사례연구

4.1 IEEE6모선계통

상기 알고리즘의 유효성을 검증하기 위하여 그림4와 같은 6모선계통[6]을 대상으로 사례연구를 하였으며 세

부 데이터는 부록 표A.1과 표A.2에 명시하였으며 송전 용량 평가시의 발전기 출력은 송전선 용량이 허용하는 한 무한대로 가능하다고 가정하였다

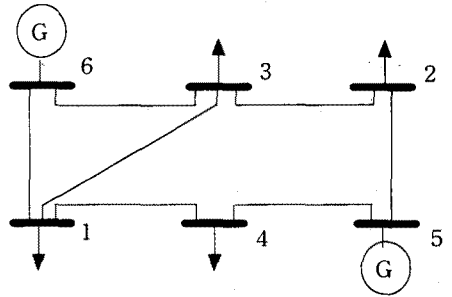


그림 4 6모선계통도

표1은 제안한 알고리즘으로부터 계산된 발전모선인 5, 6번모선으로 부터 부하모선인 1, 2, 3, 4번 모선까지 각각 송전할 수 있는 유효전력량 및 이때의 병목선로를 나타내고 있다 예를들어 1, 5번 모선사이에서는 7.0881MW의 전력을 더 송전할 수 있으며 이때 병목선로는 4-5번모선이 연결된 선로를 나타내고 있다. 계산결과를 검증하기 위하여 1번모선의 부하와 5번모선의 발전량을 각각 7.0881MW만큼 증가하여 조류계산을 하였으며 표2는 증가전, 후의 선로조류 변화상태를 나타내고 있다. 이로부터 알 수 있는 바와 같이 표1에 나타낸 바와 같이 4-5번 모선사이의 선로에 흐르는 조류가 선로용량 한계치에 근접하고 있음을 알 수 있다.

표 1 FACTS없는 계통에서의 $BITC_{ij}$ 및 병목선로

i모선	5		6		
	j모선	$BITC_{ij}$ (MW)	병목선로	$BITC_{ij}$ (MW)	병목선로
1		7.0881	4-5	32.1345	3-6
2		9.8247	4-5	10.3735	2-3
3		8.7400	4-5	19.6416	3-6
4		5.8982	4-5	22.5712	4-5

표 2 1, 5번모선에서 주입전력 증가시 선로조류

시작 모선	끝 모선	선로용량 (MW)	기본경우		1,5번모선의 주입전력 변화후		
			선로조류 (MW)	조류율 (%)	선로조류 (MW)	조류율 (%)	조류증가량 (MW)
6	1	80	41.22	52	42.08	53	+0.86
6	3	60	46.28	77	45.42	76	-0.86
3	1	50	10.59	21	12.50	25	+1.91
4	1	40	0.69	2	5.01	13	+4.32
3	2	45	35.69	79	32.92	73	-2.77
5	2	30	19.30	64	22.07	74	+2.77
5	4	35	30.69	88	35.00	100	+4.31

한편, 그림3의 FACTS장치에 의한 송전용량 증대 알고리즘 검증을 위하여 표1의 각 병목선로에 FACTS장치가 설치되는 것으로 하였다. 그 결과는 표3에 나타내었는데 FACTS장치에 의하여 작게는 1.354배(6번모선으로부터 4번모선까지의 BITC는 FACTS장치가 고려되지 않은 경우, 22.5712MW였으나 FACTS장치로 인하여 30.5616 MW로 증가했기 때문에 30.5616/22.5712 =1.354)에서 크게는 2.72배(3, 6모선사이의 경우)까지 송전용량을 증대시킬 수 있음을 알 수 있다. 그리고 표4는 4, 5번 모선사이의 선로에 FACTS장치를 설치하고 그선로의 조류를 35.00MW에 고정시킨후, 1번모선의 부하와 5번모선의 발전량을 각각 15.1097MW만큼 증가시켰을 때 선로조류 조류분포를 나타내고 있다. 표3에서의 예상대로 병목선

로가 2, 5번 모선사이 선로에서 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

표 3 FACTS가 있는 계통에서의 BITC_i 및 병목선로

i모선	5		6	
	BITC _i (MW)	병목선로	BITC _i (MW)	병목선로
1	15.1097	2-5	52.9266	1-6
2	15.0847	2-5	20.1337	3-6
3	15.0907	2-5	53.4502	1-6
4	15.1306	2-5	30.5616	3-6

표 4 4, 5번 모선사이 선로에 FACTS를 설치한 계통에서의 1, 5번모선에서 주입 전력 증가시 선로조류

선로번호	시작모선	끝모선	선로용량(MW)	송전용량 증가전		FACTS에 의한 송전용량 증가후	
				선로조류(MW)	선로조류율(%)	선로조류(MW)	선로조류율(%)
1	6	1	80	41.22	52	44.57	56
2	6	3	60	46.28	77	42.93	72
3	3	1	50	10.59	21	18.03	36
4	4	1	40	0.69	2	5.01	13
5	3	2	45	35.69	79	24.90	55
6	5	2	30	19.30	64	30.09	100
7	5	4	35	30.69	88	35.00	100

4.2 한전계통 적용

756모선과 98개의 발전기로 구성되는 수정된 한전 2000년 실계통을 대상으로 제안한 알고리즘을 적용하였다. 관련계통 및 데이터는 참고문헌[6]을 인용하였다. 표5는 대표적 발전지점인 106번모선, 113번모선, 116번모선으로 부터 수요중심지역에 위치하는 9번의 부하모선까지의 송전용량 및 병목선로를 나타내고 있다.

표 5 한전계통에서의 송전용량

순번	발전모선	부하모선	병목선로	송전용량(MW)
1	113	9	628-630	536
2	106	9	356-359	1,085
3	116	9	272-275	2,547

표5에서 나타난 병목선로는 154kV선로로서 본 경우에는 345kV선로인 86번 모선과 280번 모선사이에 FACTS기가 설치된 것으로 가정하였다. 감도해석에 의하여 86-280선로의 조류를 1950MW에 고정하고 증가가능한 송전용량을 평가한 결과는 표6과 같다. 이로부터 알 수 있는 바와 같이 FACTS에 의한 전력조류에 의하여 송전용량을 536MW에서 650MW까지 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

표 6 86, 280번 모선사이에 FACTS설치시의 송전용량

순번	발전모선	부하모선	병목선로	송전용량(MW)
1	113	9	93-112	650

5. 결 론

· 본 논문에서는 송전설비 제약으로 인하여 발전전력을 원하는 부하지점까지 충분히 수송할 수 없는 전력계통에서의 FACTS운전효과를 분석, 정상상태 운전방향을 제시하였다.

· 이를 위하여 두지점(발전지점과 부하지점)간의 최대송전전력 평가 알고리즘과 FACTS의 전력조류 제어효과를 고려한 송전전력 증대 평가 알고리즘을 제안하였다.

· 제안한 알고리즘은 특정발전전기 사업자들과 관계되는 전력 경쟁체제에서의 계통계획 및 운용에 적용되어 전력계통의 유연성을 향상시키고 동시에 계약전력을 제어하는데 활용이 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] N.G. Hingorani, "Flexible AC Transmission", IEEE Spectrum, Vol.30, No.4, April 1993, pp.40-45.
- [2] "FACTS기기개발 1단계연구(1MVA급 IGBT형 STATCON 개발)", TM 96EJ29.97.628, 전력연구원, 1997. 9
- [3] "FACTS Application", IEEE Power Engineering Society, IEEE Catalog No. 96TP 116-0, 1996
- [4] A.Edris, A.S.Mehraban, M.Rahman, L.Gyugyi, S.Arabi, T. Reitman, "Controlling the Flow, fo Real & Reactive Power", IEEE Computer Applications in Power, Vol.11, No. 1, pp.20-25, Jan. 1998 .
- [5] Maria Ilic, Francisco Galiana, Lester Fink, Anjan Bose, Pierre Mallet, Hisham Othman, "Transmission Capacity in Power Networks", Invited paper for the PSCC, Dresden, Germany, August 1996
- [6] "FACTS에 의한 계통제어 기술향상 및 복구운전 기법개발에 관한 연구", TM.96EW02.Z.97.1158, 전력연구원, '97. 8.

부 록

표 A.1 6모선계통의 모선 데이터(초기의 조류계산결과)

모선번호	모선형태	전압(pu)	위상각(Degree)	주입전력(MW+jMVAR)
1	PQ	0.998	-12.1	-52.5 - j0.0
2	PQ	0.998	-12.4	-55.0 - j0.0
3	PQ	0.999	- 9.7	-0.0 - j0.0
4	PQ	0.999	-12.0	-30.0 - j0.0
5	PV	1.020	-0.9	50.0 + j10.4
6	Slack	1.020	0.0	87.5 + j18.5

표 A.2 6모선계통의 선로데이터

연결모선	임피던스(pu)	선로용량(MW)	선로용량(MW)
1 - 6	0.0000 + j0.5180	80	41.22
3 - 6	0.0000 + j0.3700	60	46.28
1 - 3	0.0000 + j0.4070	50	10.59
1 - 4	0.0000 + j0.3000	40	0.69
2 - 3	0.0000 + j0.1330	45	35.69
2 - 5	0.0000 + j1.0500	30	19.30
4 - 5	0.0000 + j0.6400	35	30.69