

FACTS기기의 유효전력 제어특성을 고려한 모선간 송전용량 평가 알고리즘

論 文

48A-2-3

An Algorithm for BITC Evaluation considering the Power Control Characteristics of FACTS Devices

尹用範* 秋鎮夫**
(Yong-Beum Yoon · Jin-Boo Choo)

Abstract - In this paper, sensitivity based approach to estimate *BITC*(bilateral interchange transfer capacity) considering the real power flow control function of FACTS devices is presented. The real power flow setting of the FACTS devices is adjusted so that it transfers 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 devices can no longer be adjusted. The proposed algorithm is illustrated using examples of small and real life power system.

Key Words : Bilateral Interchange Transfer Capacity, FACTS Devices, Available Transfer Capacity, Active Power Control

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. 이와관련, FACTS기기를 전력계통 특성에 적합하도록 구현코자 하는 많은 연구가 국내 외적으로 활발히 이루어져[2,3,11] 실제 적용결과들도 일부 발표되고 있는 단계이다[3,4]. 이와같은 연구사례들은 크게 두 가지로 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 상호 밀접한 관계를 가지며 특히 후자에 있어서는 전자의 전력계통에 대한 안정도 분석외에도 외부계통 혹은 독립발전사업자(IPP)로부터 얼마만한 전력에너지 교환이 가능한지에 관한 송전용량 평가[5]가 필수적이다. 그리고 전력계통의 송전용량 평가에 관한 연구는 '79년 L.L.Garver[6]에 의한 최대전력 수송능력 평가방법 발표 이래 다양한 제약조건들을 고려한 많은 효율적 방법들이 제안되었다[7,8]. 특히 본 논문에서 대상으로 하고 있는 두 지점사이의 송전용량은 FACTS의 구현과 함께 많은 관심을 가지게 되었는데 '96년에 M.Ilic은 비선형으로 표현되는 $P-\delta$ 전력조류방정식의 1/4분면에서의 단조함수특성을 이용함으로써 두 지점간의 효과적인 송전용량 평가 알고리즘을 제안

[5]하였다. 그러나 이의 구현을 위해서는 계통구성요소간(발전기-선로, 선로상호) 함수특성을 알아야 하는 복잡성이 있어 대형계통 적용에는 많은 어려움이 있다. 이에 본 논문에서는 두 지점(발전지점과 부하지점)간 송전용량을 감도해석에 의하여 평가하는 알고리즘과 함께 FACTS에 의한 증대효과 평가 알고리즘을 제안함으로써 대규모 계통적용도 가능토록 하였다. 따라서 본 논문은 두 지점간의 송전용량 평가를 대상으로 할 뿐만 아니라 FACTS에 의한 효과까지도 고려할 수 있도록 했다는 점에서 계통전체의 최대부하만을 평가하는 기존의 평가방법[9]과는 상이하다.

2. 송전용량 평가문제의 정식화

2.1 문제의 정의

본 논문에서 다루는 문제는 FACTS기기가 없는 계통에서의 두 지점, 즉 발전기 모선과 부하모선사이의 최대송전용량을 평가함과 동시에 특정선로에 FACTS기기를 설치, 전력조류를 제어함에 의하여 부가적으로 증대가능한 송전용량을 평가하는 것으로 한다. 일반적으로 송전용량을 4개부류[10]로 구분하고 있는데 본 논문에서는 두 지점간 송전용량, 즉 *BITC* (Bilateral Interchange Transfer Capacity)를 대상으로 한다. *BITC*는 계통 안전운전 영역내에서 특정 발전지점 i 모선으로부터 특정 부하지점 j 모선까지 송전할 수 있는 증분최대 유효전력으로 정의되며 이를 수식으로 표현하면 식(1)과 같다.

$$BITC_{ij} = \text{Max } \Delta P_i \quad (1)$$

R

* 正 會 員 : 韓電電力研究院 先任研究員 · 工博
** 正 會 員 : 韓電電力研究院 首席研究員 · 工博
接受日字 : 1998年 10月 27日
最終完了 : 1999年 1月 9日

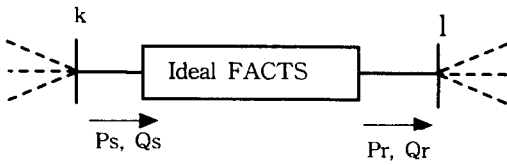


그림 1a 에너지원을 갖지않는 이상적 FACTS기기
Fig. 1a Ideal FACTS Devices without energy source

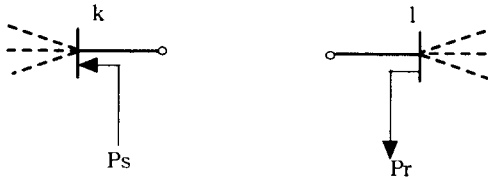


그림 1b 송전용량 평가에서의 이상적 FACTS기기 모델
Fig. 1b Equivalent Ideal FACTS Devices model in BITC evaluation

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

에 따른 선로별 상차각은 식(8)와 같이 나타낼 수 있는데 $[\Delta \theta_{bus}]$ 는 식(7)에 i 번째 행이 1, j 번째 행이 -1, 나머지는 모두 영으로 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 모선의 발전량과 j 모선의 부하량을 단위만큼 변화시켰을 때의 상차각 감도벡터 ($nl \times 1$)
 $[A]$: 계통 Incidence 행렬 ($nb \times nl$)
 nl : 선로수, nb : 모선수

식(8)에서 m, n 모선사이의 상차각 감도를 S_{ij}^{mn} 이라 하면 각 선로의 위상차 제약을 고려한 $BITC_{ij}$ 는 식(9)로부터 계산된다.

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

여기서, ΔP_{ij}^{mn} 는 m, n 모선사이의 위상차에 관한 제약조건을 만족하면서 i 모선에서 j 모선으로 부가적으로 송전할 수 있는 최대유효전력량을 나타낸다. 따라서 모든 m, n 에 대하여 ΔP_{ij}^{mn} 을 구한후의 $BITC_{ij}$ 는 식(10)으로부터 결정된다. 상기 식들에 의하여 $BITC$ 를 평가하게되며 특히 식(10)을 통해서는

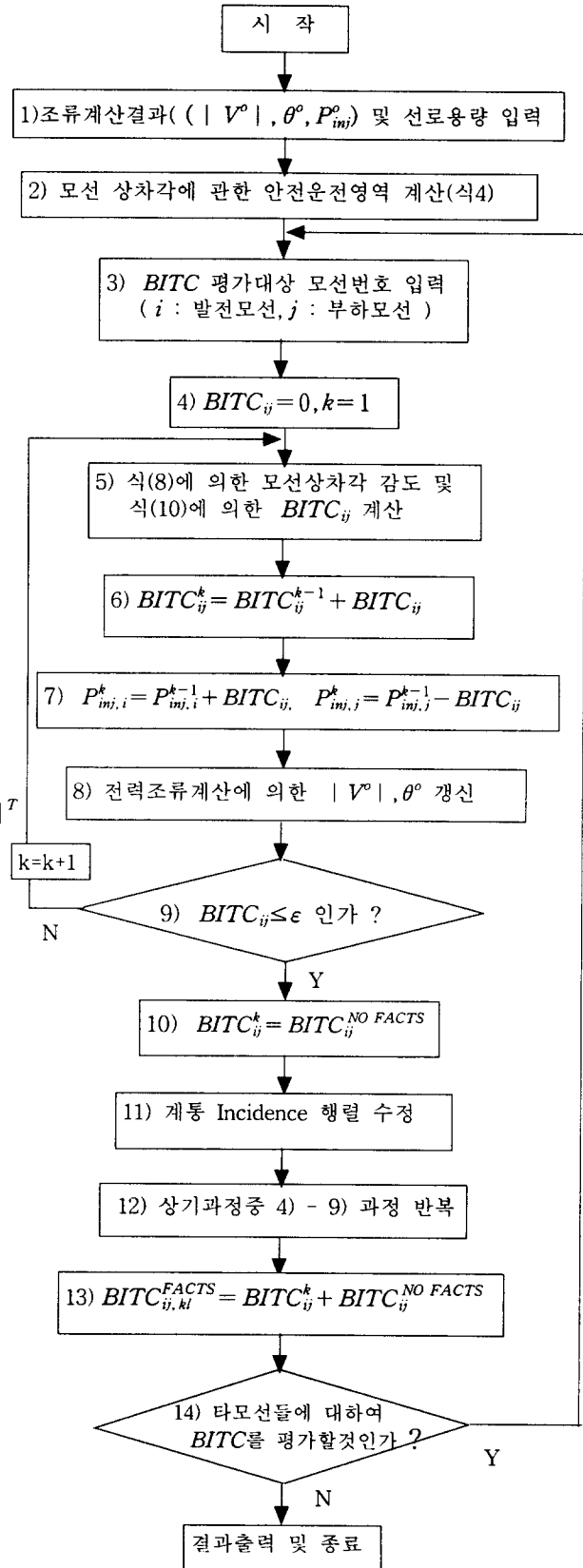


그림 2 BITC 평가 흐름도
Fig. 2 Flow chart of BITC evaluation

$BITC_{ij} = \Delta P_{ij}^{inj}$ 가 되는 k, l 모선에 의하여 병목선로(k 모선과 l 모선을 연결하는 선로)를 알 수 있다.

3.3 FACTS기기의 조류제어를 고려한 BITC 알고리즘

임의의 선로에 FACTS기기를 설치함으로써 병목선로에서의 전력조류 제약을 극복하고 얼마만큼의 $BITC_{ij}$ 를 더 증가시킬 수 있는가 하는 문제는 그 선로에 설치된 FACTS를 그림1.b와 같이 등가화한 계통에서의 $BITC$ 를 평가하는 것과 동일하게 된다. 이와 관련하여 본 논문에서는 병목선로인 k, l 모선사이에 FACTS기기가 설치된 것으로 가정하였다. FACTS에 의하여 k, l 모선사이에 일정하게 흐르도록 제어되는 전력조류를 P_s 라 하면 FACTS기기가 고려된 계통에서의 모선중분주 입전력은 식(11)과 같이 주어지며 이때의 Incidence행렬은 식(8)의 Incidence행렬에서 k, l 모선사이의 선로에 해당되는 열을 제외한 행렬로 주어진다.

$$\begin{aligned} P_{inj,l} &= P_{inj,l}^c - P_s, \\ P_{inj,k} &= P_{inj,k}^c + P_s, \\ P_{inj,p} &= P_{inj,p}^c \quad p \neq k, l \end{aligned} \quad (11)$$

단, $P_{inj,i} : P_{inj}$ 벡터의 i 번째 요소

따라서 FACTS기기가 설치된 계통에서의 $BITC_{ij}^{FACTS}$ 결정은 앞의 식(9),(10)이용과정과 동일하며 전체적인 $BITC$ 평가 흐름도는 그림2와 같다.

4. 사례연구

4.1 6모선계통

상기 알고리즘의 유효성을 검증하기 위하여 그림3과 같은 6모선계통[8]을 대상으로 사례연구를 하였으며 세부 데이터는 부록 표A.1과 표A.2에 명시하였다. 그리고 송전용량 평가시의 발전기 출력한계는 고려하지 않았다.

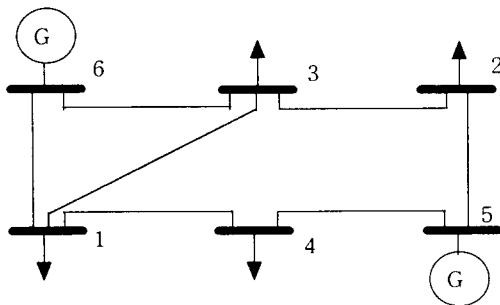


그림 3. 6모선계통도
Fig. 3 Six bus system

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

표 1 FACTS기기가 없는 계통의 $BITC_{ij}$ 및 병목선로

Table 1 $BITC_{ij}$ and bottleneck lines in six bus system without FACTS Devices

i모선	5		6	
	$BITC_{ij}$ (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 변화시 선로조류

Table 2 Line flow in case of injection power change at bus 1, 5

시작 모선	끝 모선	용량 (MW)	기본경우		1,5번모선 주입전력변화시		
			조류 (MW)	조류율 (%)	조류 (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, FACTS기기에 의한 송전용량 증대 알고리즘 검증을 위하여 표1의 각 병목선로에 FACTS기기가 설치되는 것으로 하였다. 그 결과는 표3에 나타내었는데 FACTS기기에 의하여 1.35배(6번모선으로부터 4번모선까지의 $BITC$ 는 FACTS기기가 없는 경우, 22.5712MW였으나 FACTS기기로 인하여 30.5616MW로 증가했기 때문에 $30.5616/22.5712 = 1.35$)에서 2.72배(3, 6모선사이의 경우)까지 송전용량을 증대시킬 수 있음을 알 수 있다. 그리고 표4는 4, 5번 모선사이의 선로에 FACTS기기를 설치하고 그 선로의 조류를 35.00MW에 고정시킨후, 1번모선의 부하와 5번모선의 발전량을 각각 15.1097MW만큼 증가시켰을 때 선로조류 조류분포를 나타내고 있다. 표3에서의 예상대로 병목선로가 2, 5번 모선사이 선로에서 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

표 3 FACTS기기가 있는 계통의 $BITC_{ij}$ 및 병목선로

Table 3 $BITC_{ij}$ and bottleneck lines in power system with FACTS Devices

i모선	5		6	
	$BITC_{ij}$ (MW)	병목선로	$BITC_{ij}$ (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

4.2 실계통 적용

본 알고리즘을 그림 4와 같은 345kV기간계통으로 대표되는 발전기 234대의 846모선계통에 적용하였다. 계산결과 검증을 위한 조류계산은 계통해석용 프로그램인 PSS/E를 이용했고 감도계산에 필요한 자코비안행렬 구성과 이의 역행렬 계산은 PSS/E에서 지원되는 IPLAN기능과 기존 프로그램을 사용했다. 표5는 발전모선인 10400으로부터 부하모선(10개모선)까지 부가

적으로 송전할 수 있는 전력량 및 FACTS기기 제어에 의한 추가송전량 평가결과를 나타내고 있다. 이로부터 FACTS가 없는 경우의 추가 송전용량은 9.8MW~124MW이었으나 병목선로에 FACTS를 설치, 선로용량만큼만 흐르도록 제어함에 의하여 31MW~151MW의 송전용량 증대 효과를 얻었다. 이때 병목선로는 그림4의 기간계통에 나타내지 않은 부하모선 부근의 154kV선로에서 발생하였으며 본 논문에서는 전체적인 계통구성 표현상의 어려움으로 인하여 표시를 생략하였다.

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

Table 4 Line flow in case of injection power change at bus 1, 5 in power system with FACTS Devices between bus 4 and bus 5

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

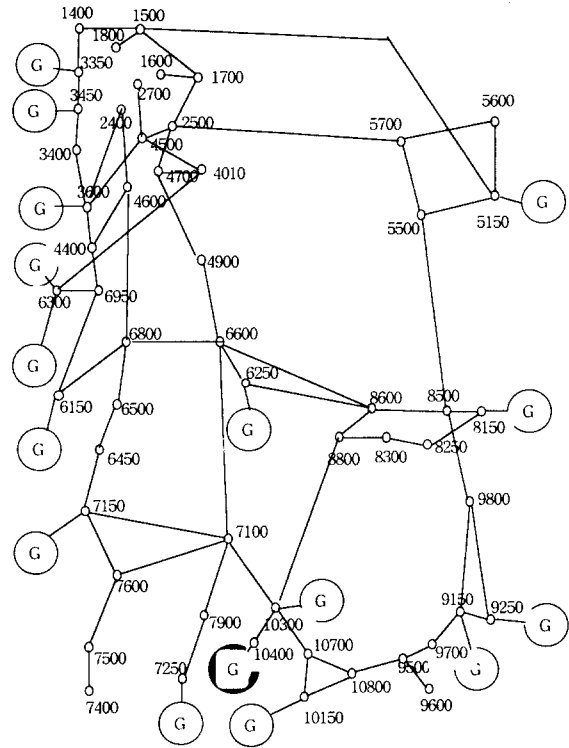


그림 4 실계통구성도

Fig. 4 Network Diagram of real life power system

표 5 모선10400부터 부하지점까지의 송전용량

Table 5 $BITC$ from bus # 10400 to load buses

부하지점	FACTS가 없는 경우	FACTS설치시
1400	109.8614 MW	133.5962 MW
1500	114.9698 MW	138.6215 MW
1600	116.4950 MW	139.8836 MW
1700	118.1780 MW	133.0042 MW
1800	109.5685 MW	134.4134 MW
2400	9.8022 MW	31.8536 MW
2500	122.9264 MW	148.7896 MW
2700	112.0379 MW	137.3248 MW
4600	110.0450 MW	135.6471 MW
4700	124.1052 MW	151.2263 MW

5. 결 론

본 논문에서는 송전설비 제약으로 인하여 발전전력을 원하는 부하지점까지 충분히 수송할 수 없는 전력계통에서의 FACTS기기의 운전효과를 분석하고 정상상태에서의 운전방향을 제시하였다.

· 이를 위하여 특정의 발전지점과 부하지점사이의 최대 송전전력 평가 알고리즘과 FACTS기기의 전력조류 제어효과를 고려한 송전전력 증대 평가 알고리즘을 제안하였다.

· 제안한 알고리즘은 특정 발전기사업자(IPP)들과 관계되는 전력경쟁체계에서의 계통계획 및 운용에 적용되어 전력계통의 유연성을 향상시킴과 동시에 제약전력을 제어하는데 활용이 기대된다.

· 본 논문에서는 FACTS기기가 병목선로에 설치되는 것으로 가정하였으나 향후 본 알고리즘을 확장하여 임의의 선로에 설치된 FACTS기기에 대하여도 송전용량 평가가 가능하도록 할 예정이다.

참 고 문 헌

[1] N.G. Hingorani, "Flexible AC Transmission", IEEE Spectrum, Vol.30, No.4, April 1993, pp.40-45.
 [2] "FACTS기기가 개발 I단계연구(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] M.D.Ilic, Y.T.Yoon and A.Zobian, "Available transmission capacity and its value under open access", 96WM 349-1, PWRS, Jan. 21-25, 1996, Baltimore, MD
 [6] L.L.Garver, P.R.Van Horne, K.A. Wirgau, "Load Supplying Capability of Generation-Transmission Networks", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-98, No. 3, May/June, 1979
 [7] L.Chen, H.Suwa, J.Toyoda, "Power Arrival Evaluation of Bulk System including Network Constraints Based on Linear Programming Approach", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 6, No. 1, Feb. 1991
 [8] J.Toyoda, L.Chen, T.Minakawa & T.Yamada, "New Indices and Computation Techniques for Composite Systems Reliability Evaluation", the paper of CIGRE Reliability Symposium, 1A-01, P.1(1991)
 [9] K.S.Kook, M.H.Jeong, J.Y.Namkung, B.Lee and K.Y. Song, "Evaluation of LSC and System Margin using Successive Linear Programming", Trans. of KIEE, Vol. 47, No. 4, April, 1988
 [10] Maria Ilic, Franscisco Galiana, Lester Fink, Anjan Bose, Pierre Mallet, Hisham Othman, "Transmission Capacity in Power Networks", Invited paper for the PSCC, Dresden, Germany, August 1996
 [11] "FACTS에 의한 계통제어 기술향상 및 복구운전기법개발에 관한 연구", TM.96EW02.Z.97.1158, 전력연구원, '97. 8.

부 록

표 A.1 6모선계통의 초기 조류계산 데이터

Table A.1 Initial load flow data of six bus system

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

Table A.2 Transmission line data of six bus system

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

저 자 소 개



윤 용 범(尹 用 範)

1958년 9월 28일생. 1984년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1996년~1997년 미국 MIT Visiting Scientist. 현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실 차세대 전력전송그룹 선임연구원. 대한전기학회 회원. IEEE 회원. 주요연구분야 : 전력계통 안정화, FACTS 운용 및 제어



추 진 부(秋 鎭 夫)

1950년 1월 7일생. 1977년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 한전 전력연구원 전력계통연구실 수석연구원