

전압안정도 여유를 고려한 수송능력산정 알고리즘의 개발에 관한 연구

(A Study on Development of Power Transfer Capability Calculation Algorithm Considering Voltage Stability Margin)

김용하* · 이 범 · 문혁기 · 정현성 · 조성린

(Yong - Ha Kim · Buhm Lee · Huck - Kee Moon · Hyun - Sung Jung · Sung - Rin Jo)

요 약

전력산업구조 개편 시 변화된 전력계통 환경하에서 효율적인 계통운용 및 계획을 위해서는 계통의 수송능력(Power Transfer Capability)을 산정하는 작업이 필수적이다. 또한 송전망의 자유로운 접근(Open Access)과 같은 전력정책의 변화로 인하여 전력계통은 더욱더 고부하상태에서 운전될 가능성이 높아지게 되었다. 전력계통의 부하가 증가하면 전압안정도 여유가 감소하므로 전력계통은 전압붕괴와 같은 전압안정도 문제를 야기시킬 수 있다. 본 연구에서는 전력계통의 수송능력 산정문제에 대해 전압안정도여유 제약을 고려 할 수 있는 수송능력산정 알고리즘 개발에 연구의 목적을 두고 있다. 이를 위해 본 연구에서는 전압안정도 여유제약식을 정식화한 다음 이를 수송능력 산정문제에 반영할 수 있는 방법을 제안하였다. 그리고 이를 시험계통에 적용하여 본 연구의 타당성을 검증하고 유용한 정보를 도출하였다.

Abstract

This paper presents a power transfer capability calculation algorithm considering voltage stability margin. In this method, voltage stability margin constraints are incorporated into a power transfer capability formulation to guarantee adequate voltage security levels in an interconnected power system. The proposed method is applied to IEEE-24 reliability test systems and the results show the effectiveness of the method.

Key Words: Transfer capability, Voltage stability margin constraint, Costate method, Interior point method

1. 서 론

최근, 송전망 사용에 대한 규제완화(Deregulation)와 송전망의 자유로운 접근(Open Access)과 같은 전력정책의 변화로 인해 인접지역과의 연계가 용이하게 되었으며, 이로 인해 타 지역과의 수급계약이 활발해 질 수 있게 되었다. 이러한 변화된 전력계통 환경하에서 효율적인 계통운용 및 계획을 위해서는 계통의 수송능력(Power Transfer Capability)을 산

* 주저자 : 인천대학교 전기공학과 교수
Tel : 032-770-8434, Fax : 032-766-8434
E-mail : yhkim@incheon.ac.kr
접수일자 : 2003년 1월 8일
1차심사 : 2003년 1월23일
심사완료 : 2003년 2월20일

정하는 작업이 필수적이다. 그리고 송전망의 자유로운 접근(Open Access)과 같은 전력정책의 변화로 인하여 전력계통은 더욱더 고부하상태에서 운전될 가능성이 높아지게 되었다. 전력계통의 부하가 증가하면 전압안정도 여유가 감소하므로 전력계통은 전압붕괴와 같은 전압안정도 문제를 야기시킬 수 있다. 전압안정도여유는 전압붕괴점과 현재 운전점사이의 거리를 의미한다. 전압안정도문제가 비교적 최근에 발생하는 현상일지라도 전력계통의 안전한 운전과 계획을 위하여 전압안정도 문제와 관련된 연구가 지금까지 활발하게 진행되어 왔다. 먼저, 문헌[1]에서는 전압안정도여유를 원하는 값만큼 확보하기 위한 최적 조상설비 설치량을 구할 수 있는 무효전력원 배분계획 알고리즘을 제안하였다. 문헌[2]에서는 전압안정도 여유를 최대화하기 위한 최적 직·병렬 compensation parameter 설정치를 구하는 방법이 제시되었다. 그리고 문헌[3, 4]에서는 최적조류계산에 전압안정도문제를 결합하는 방법을 제안하였다. 본 연구에서는 전력계통의 수송능력 산정문제에 대해 전압안정도여유 제약을 고려 할 수 있는 수송능력산정 알고리즘개발에 연구의 목적을 두고 있다. 이를 위해 본 연구에서는 전압안정도 여유제약식을 정식화한 다음 이를 수송능력산정문제에 반영할 수 있는 방법을 제안하였다. 그리고 이와 같이 정식화된 비선형 수송능력계산문제의 효율적인 계산을 위해 정확도면에서 우수한 것으로 입증된 Costate방법[5]을 사용하여 비선형식으로 표현되는 수송능력 계산문제를 선형화한 다음 Interior Point 방법을 이용한 LP문제로 수송능력계산을 수행하였다. 또한 본 연구에서 제안한 방법을 시험계통에 적용시켜 본 연구의 타당성을 검증하고 각종 유용한 정보를 도출하였다.

2. 수송능력계산문제

일반적으로 수송능력 계산문제는 주어진 부하 및 계통조건하에서 연구지역에서 참여지역으로 또는 참여지역에서 연구지역으로 보낼 수 있는 최대전력수송능력을 계산하는 문제이며 다음과 같이 정식화된다.

$$Max \sum_{(i,j) \in K} P_{ij} \quad (1)$$

S.t. 조류방정식

운전제약조건

제어변수의 상·하한

단, P_{ij} : 선로 i-j사이를 흐르는 유효전력

K : 지역(Area)들을 연결하는 연계선의 집합

본 연구에서는 위의 식(1)로 정식화되는 수송능력 문제의 효율적인 계산을 위하여 이와 관련된 수송능력계산 문제를 다음과 같이 정식화하였다[6].

$$Max. \mu \sum_{i=1}^n (|\Delta P_{Mi}| + |\Delta Q_{Mi}|) + \sum_{(i,j) \in K} P_{ij} \quad (2)$$

S.t. 전력평형식

부하모션전압크기

선로의 피상조류

발전기모선의 무효전력

제어변수의 상하한

단, μ : 가상발전기 출력의 가중치

$\Delta P_{Mi}, \Delta Q_{Mi}$: 가상발전기 출력 변화량

3. 전압안정도여유를 고려한 수송능력

3.1 전압안정도 여유제약식의 정식화

본 연구에서는 전력계통의 수송능력계산시에 전압안정도문제를 고려하기 위하여 전압안정도 여유제약을 수송능력계산 문제에 반영하였으며, 이때 전압안정도 여유 VSM은 다음 식(3)과 같이 정의된다 [1].

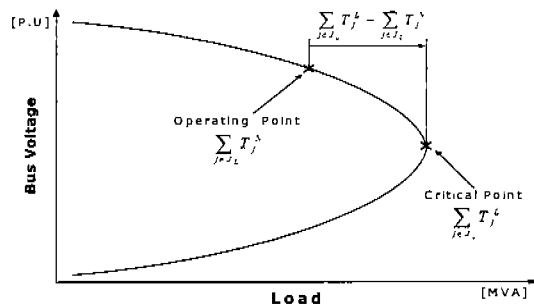


그림 1. 전압안정도 여유
Fig. 1. Voltage Stability Margin

$$VSM = \frac{\sum_{j \in J_L} T_j^L - \sum_{j \in J_L} T_j^N}{\sum_{j \in J_L} T_j^L} \quad (3)$$

- 단, N : 현재 운전점
- L : 전압안정한계점
- T_j^L : 전압안정한계점에서 j 모선의 피상부하
- T_j^N : 현재 운전점에서 j 모선의 피상부하
- J_L : 부하모선의 집합

식(3)에서 안정한 초기 운전조건에 대하여 Voltage Stability Margin(이하 VSM)은 0과 1사이의 값을 가지며 전압안정한계점에서는 VSM 은 0이다. 그리고 VSM 의 음(negative)의 값은 회로망이 지정된 초기의 MVA수요를 공급할 수 없다는 것을 의미한다. 한편, 전력계통의 안전한 운전을 위해서는 현재의 운전점이 전압붕괴점으로부터 안전한 전압안정도여유를 유지하여야 한다. 이때, 전압안정도 여유를 확보하기 위한 전압안정도 여유제약은 다음 식(4)와 같이 표현된다.

$$\frac{\sum_{j \in J_L} T_j^L - \sum_{j \in J_L} T_j^N}{\sum_{j \in J_L} T_j^L} \geq VSM^{spec} \quad (4)$$

단, VSM^{spec} : 전압안정도여유 지정치($0 < VSM^{spec} < 1$)

그리고, 전압안정도 한계점에서의 i 모선의 피상부하 T_i^L 은 다음 식(5)와 같이 표현할 수 있다.

$$T_i^L = \beta_i \left(\sum_{j \in J_L} T_j^L - \sum_{j \in J_L} T_j^N \right) + T_i^N \quad (5)$$

단, β_i : 계통 전체부하증가에 대한 부하모선 i 의 부하증가율

위의 식(4)식와 (5)식으로부터 다음 식(6)이 유도된다.

$$T_i^L \geq T_i^N + \frac{VSM^{spec}}{1 - VSM^{spec}} \beta_i \sum_{j \in J_L} T_j^N \quad (6)$$

지금, i 모선에서의 역률 df_i 이 일정하다고 가정하면 위의 식(6)으로 표현되는 전압안정도 여유제약식은 다음 식(7)과 (8)과 같이 유효 및 무효성분으로

나누어 진다.

$$P_i^L \geq df_i \left[T_i^N + \frac{VSM^{spec}}{1 - VSM^{spec}} \beta_i \sum_{j \in J_L} T_j^N \right] = CP_i \quad (7)$$

$$Q_i^L \geq (1 - df_i^2)^{\frac{1}{2}} \left[T_i^N + \frac{VSM^{spec}}{1 - VSM^{spec}} \beta_i \sum_{j \in J_L} T_j^N \right] = CQ_i \quad (8)$$

3.2 수송능력문제에 대한 전압안정도여유 제약식의 고려

식(2)로 구성되는 수송능력계산문제를 앞에서 유도한 전압안정도 여유제약식 식(7), (8)까지 고려하여 재구성하면 수송능력계산문제는 다음과 같이 정식화된다. 이때, 제약조건식은 현재 운전점에서의 운전제약과 전압안정한계점에서의 운제약으로 구분된다.

목적함수

$$Max. \mu \sum_i^n (|\Delta P_{Mi}| + |\Delta Q_{Mi}|) + \sum_{(i,j) \in K} P_{ij} \quad (9)$$

제약조건식

① 현재 운전점에서의 운전제약

$$\sum P_{Gi} - P_L - q = 0 \quad : \text{전력평형식} \quad (10)$$

$$V_{Di}^{min} \leq V_{Di}^N \leq V_{Di}^{max} : \text{부하모선 전압크기} \quad (11)$$

$$Q_{Gi}^{max} \leq Q_{Gi}^N(X^N, U) \leq Q_{Gi}^{min} : \text{발전기모선의 무효전력} \quad (12)$$

$$F_i^N(X^N, U) \leq F_i^{max} : \text{선로피상조류} \quad (13)$$

단, P_{Gi} : i 번째 발전기의 유효전력출력

P_L : 총계통부하

q : 총계통손실

X^N : 상태변수(현재운전점에서의 부하모선 전압크기, 위상각)

U : 제어변수(변압기 탭, 발전기모선 전압크기, 조상설비, 발전기의 유효 전력출력)

② 전압안정도여유와 관련된 운전제약

$$P_i^L(X^L, U) \geq CP_i, \quad : \text{전압안정도 여유제약조건} \quad (14)$$

유효부분

$Q_i^L(X^L, U) \geq CQ_i$: 전압안정도 여유제약조건의
무효부분 (15)

$P_G^{\min} \leq P_G^L(X^L, U) \leq P_G^{\max}$: 전압안정한계점에서
발전기 모선의 유효전력 (16)

단, X^L : 상태변수(전압안정한계점에서의
부하모선 전압크기, 위상각)

③ 제어변수관련 제약식

$t_i^{\min} \leq t_i \leq t_i^{\max}$: 변압기탭 (17)

$V_G^{\min} \leq V_G \leq V_G^{\max}$: 발전기 모선전압 (18)

$b_{c_i}^{\min} \leq b_{c_i} \leq b_{c_i}^{\max}$: 모든 Shunt Capacitor가
있는 모선 i 에 대해 (19)

$b_{r_i}^{\min} \leq b_{r_i} \leq b_{r_i}^{\max}$: 모든 Shunt Reactor가
있는 모선 i 에 대해 (20)

$P_G^{\min} \leq P_G^N \leq P_G^{\max}$: 발전기의 유효전력출력(21)

결국, 전압안정도여유제약식을 고려한 수송능력
계산문제는 앞의 식(9) ~ (21)로 구성되며, 이 경우
식(21)의 발전기출력 P_G 는 현재 운전점에서의 운전
제약조건에서는 수송능력최대화를 위한 제어변수로
사용되지만 전압안정도여유와 관련된 제약조건에서
는 종속변수가 되어 운전제약조건에 포함된다. 그
이유는 전압안정도여유와 관련된 제약조건에서는
LP를 이용한 최적화계산에서 주어진 전압안정도 여
유를 확보하기 위하여 전압안정한계점이 증가할 때,
즉 한계점부하가 증가할 때 발전기출력 P_G 는 이 증
가된 부하에 대하여 수급조건을 만족하도록 변화를
해야 하므로 종속변수로 취급된다.

3.3 선형계획문제로의 정식화

본 연구에서는 식(9)~식(21)으로 구성되는 수송
능력계산을 LP문제로 해결하였고, 이 경우 비선형식
의 선형화를 위하여 대규모 계통에서 계산속도와 정
확도 면에서 효율성이 우수한 것으로 입증된
Costate 방법을 이용하였다. 그리고 선형계획법을
사용한 최적화 모델에 포함되는 변수의 개수를 줄이
기 위해서 가상발전기 출력 및 발전기의 출력을 각
각 하나의 변수로 표현하여 계산량을 감소시키도록
하였다[6]. 따라서, 식(9)~식(21)으로 구성되는 수송

능력계산문제는 다음 식(22)~(36)과 같이 문제의
크기가 축소된 선형계획문제로 정식화된다.

목적함수

$$Max. c_{F_1} v + \sum_{i=1}^{NAREA} c_{F_u} w_i + \sum_{c=NAREA+2}^{NCV} c_{F_c} \Delta u_c \quad (22)$$

제약조건식

① 현재 운전점에서의 운전제약

전력평형식

$$a_{e_1} v + \sum_{i=1}^{NAREA} a_{e_u} w_i + \sum_{c=NAREA+2}^{NCV} a_{e_c} \Delta u_c = -g_s(X^0, U^0) \quad (23)$$

부하모선전압크기

$$\Delta V_{D_i}^{\min} \leq a_{v_i} v + \sum_{i=1}^{NAREA} a_{v_u} w_i + \sum_{c=NAREA+2}^{NCV} a_{v_c} \Delta u_c \leq V_{D_i}^{\max} \quad (24)$$

선로의 피상조류

$$a_{r_i} v + \sum_{i=1}^{NAREA} a_{r_u} w_i + \sum_{c=NAREA+2}^{NCV} a_{r_c} \Delta u_c \leq \Delta F_i^{\max} \quad (25)$$

발전기모선의 무효전력

$$\Delta Q_{G_i}^{\min} \leq a_{q_i} v + \sum_{i=1}^{NAREA} a_{q_u} w_i + \sum_{c=NAREA+2}^{NCV} a_{q_c} \Delta u_c \leq \Delta Q_{G_i}^{\max} \quad (26)$$

② 전압안정도여유 관련 운전제약

전압안정도 여유제약조건의 유효부분

$$\sum_{c=NAREA+2}^{NCV} a_{vp_c} \Delta u_c \geq \Delta CP_i \quad (27)$$

전압안정도 여유제약조건의 무효부분

$$\sum_{c=NAREA+2}^{NCV} a_{vq_c} \Delta u_c \geq \Delta CQ_i \quad (28)$$

전압안정한계점에서 발전기 모선의 유효전력

$$\Delta P_{G_i}^{\min} \leq \sum_{c=NAREA+2}^{NCV} a_{p_c} \Delta u_c \leq \Delta P_{G_i}^{\max} \quad (29)$$

③ 제어변수관련 제약식

가상발전기 출력 감소율

$$0.0 \leq v \leq 1.0 \quad (30)$$

i 번제지역의 경제급전발전량의 변화량

$$P_{ED_i} - P_{ED_i}^{\min} \leq w_i \leq P_{ED_i}^{\max} - P_{ED_i} \quad (31)$$

전압안정도 여유를 고려한 수송능력산정 알고리즘의 개발에 관한 연구

발전기모선별 개별급전발전량

$$P_{ID,i} - P_{ID,i}^{\min} \leq \Delta P_{ID,i} \leq P_{ID,i}^{\max} - P_{ID,i} \quad (32)$$

발전기모선 전압크기

$$V_{Gi} - V_{Gi}^{\min} \leq \Delta V_{Gi} \leq V_{Gi}^{\max} - V_{Gi} \quad (33)$$

변압기 탭

$$t_l - t_l^{\min} \leq \Delta t_l \leq t_l^{\max} - t_l \quad (34)$$

Shunt Capacitor

$$b_{ci} - b_{ci}^{\min} \leq \Delta b_{ci} \leq b_{ci}^{\max} - b_{ci} \quad (35)$$

Shunt Reactor

$$b_{ri} - b_{ri}^{\min} \leq \Delta b_{ri} \leq b_{ri}^{\max} - b_{ri} \quad (36)$$

NAREA : 지역 수

NCV : 제어변수의 수

c_s, a_s : 선형화식의 각 제어변수에 대한 계수

u_c : v, w 를 제외한 제어변수

$P_{ED,i}$: i 번째 지역의 ED의 경제급전 발전량

$P_{ID,i}$: i 번째 모선의 개별급전 발전량

본 연구에서 제안한 알고리즘의 흐름도는 그림2와 같다.

본 연구에서는 제안한 알고리즘을 IEEE RTS-24 모델계통에 적용시켜 각종 유용한 정보를 도출해 내었다.

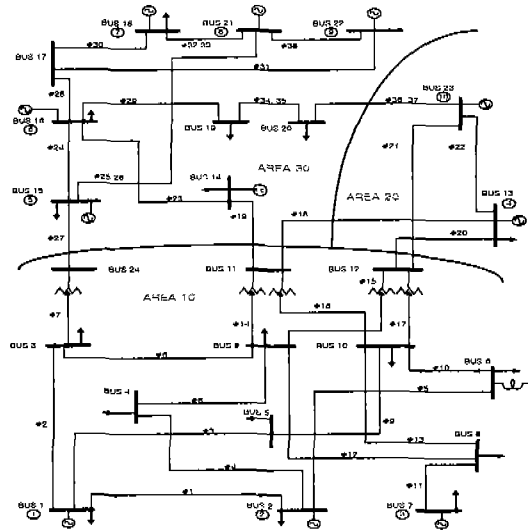


그림 3. IEEE RTS-24 모델 계통
Fig. 3. Model System of IEEE RTS-24

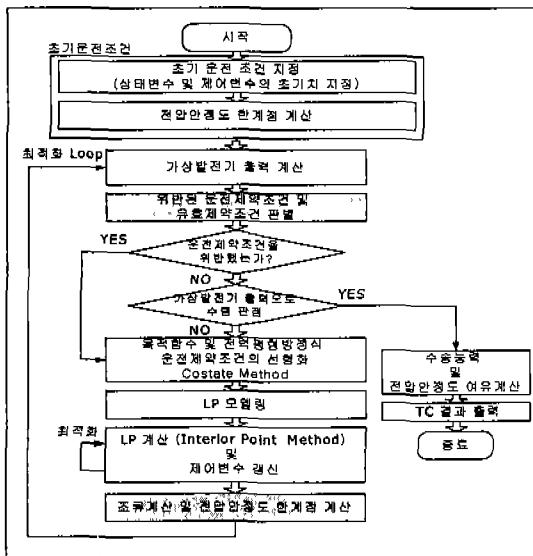


그림 2 제안한 알고리즘의 흐름도
Fig. 2 Flow Chart of proposed Algorithm

4. 사례연구

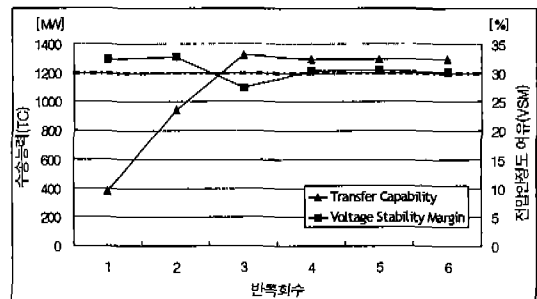


그림 4. 전압안정도여유와 수송능력의 수렴과정
Fig. 4. Convergence Process of Transfer Capability & Voltage Stability Margin

먼저, 그림4는 전압안정도여유 지정치를 30[%]로 지정한 경우의 반복횟수별 수송능력과 전압안정도 여유 계산치에 대한 수렴과정을 보여준다. 그림4로부터 알 수 있듯이 본 연구에서 제안한 방법은 반복계산 횟수 6회만에 수렴하였으며 수송능력은 1294[MW]로 계산되었다. 이 그림에서 전압안정도 여유가 1회, 2회, 4회 그리고 5회의 경우 전압안정도여유 지정치 (30%)를 만족하였으나 해에 수렴하지 않은 이유는 1회때는 부하모선전압제약, 선로피상조류제약, 발전

기모선무효전력제약을 위반하였고 2, 4, 5회때는 선로피상조류제약을 위반하였기 때문에 수렴하지 못하였으며, 최종적으로 6회에 모든 운전제약조건을 만족하게되어 수렴하였다. 다음에 그림5는 주어진 전압안정도 여유지정치로부터 계산된 전압안정도여유에 대한 계산치를 보여준다.

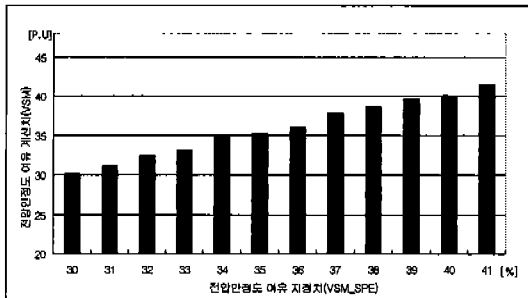


그림 5. 전압안정도여유 지정치와 계산치의 비교
Fig. 5. Comparison of Specific value of Voltage Stability Margin and Voltage Stability Margin

이 그림5로부터 전압안정도 여유제약조건을 수송능력계산문제에 반영함으로써 계통운영자가 목표로서 전압안정도 여유를 확보하면서 수송능력을 계산할 수 있음을 알 수 있다.(참고로 수송능력계산문제에 전압안정도 여유제약을 고려하지 않고 수송능력을 계산한 경우 전압안정도 여유는 26.4[%], 그리고 수송능력은 1308[MW]로 계산되었다.)

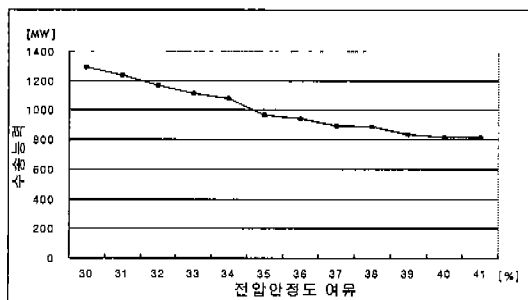


그림 6. 전압안정도 여유증가에 따른 수송능력의 변화
Fig. 6. Trend of Transfer Capability according to Increase of Voltage Stability Margin

다음에, 그림6은 전압안정도여유 지정치를 증가 시켜가면서 계산한 수송능력의 계산결과를 보여준

다. 이 결과 일반적으로 전압안정도 여유를 많이 확보할수록 수송능력이 줄어든다는 것을 보여준다.

5. 결론

본 연구에서는 연계계통에서의 전압안정도여유를 고려한 수송능력산정 알고리즘을 제안하였다. 이를 위해 본 연구에서는 전압안정도 여유제약식을 정식화한 다음 이를 수송능력 산정문제에 반영할 수 있는 방법을 제시하였다. 그리고 이와 같이 정식화된 비선형 수송능력계산문제의 효율적인 계산을 위해 정확도면에서 우수한 것으로 입증된 Costate방법을 사용하여 비선형식으로 표현되는 수송능력계산문제를 선형화한 다음 이를 Interior Point 방법을 이용한 LP문제로 수송능력계산을 수행하였다. 그 결과 본 연구에서 제안한 수송능력계산 방법을 통하여 계통 운영자가 원하는 전압안정도 여유를 확보하면서 연계 계통으로 보낼 수 있는 수송능력을 효율적으로 계산할 수 있었다. 이후 이에 기초하여 수송능력계산문제에 상정사고를 고려할 수 있는 알고리즘을 개발하고 실제계통에의 적용을 통해 실질적인 각종 정보를 도출하는 작업이 필요할 것으로 사료된다.

- 감사의 글 -

"본 연구는 한국과학재단 지정 인천대학교 동북아 전자물류 연구센터의 지원에 의한 것임"

References

- (1) O.O.Obadina G.J.Berg, "VAR PLANNING FOR POWER SYSTEM SECURITY" IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 2, May 1989.
- (2) C.A. Canizares, editor, "Calculating optimal system parameters to maximize the distance to saddle node bifurcations", IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Application, Vol.45, No.3, March 1998, pp.225-237.
- (3) D.Chattpadhyay, D.Gan, "Dispatch optimization incorporating transient and voltage stability constraints", Proceedings of IEEE PES Summer Meeting, Vol.4, 2000, pp.516-521.
- (4) W.Rosehart, C. Canizares, V.Quintana, "Costs of voltage

- security in electricity markets”, Proceedings of IEEE PES Summer Meeting , Vol.4, 2000, pp.2115-2120.
- [5] A.P. Meliopoulos, Power System Control- Theory and Operation, EE6520 Notes, Georgia Tech.1997.
- [6] 김용하, 이범, 최상규, 문혁기, 정현성, “환경제약을 고려한 수송능력산정 알고리즘의 개발에 관한 연구”, 전기학회 논문지 A권 제51권, 제11호, pp 551-558, 11, 2002.

◇ 저자소개 ◇

김용하(金龍河)

1959년 5월 16일생. 1982년 고려대학교 전기공학과 졸업. 1987년 고려대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1992~현재 인천대학교 전기공학과 교수.

Tel : (032) 770-8434

E-mail : yhkim@incheon.ac.kr

이 범(李 范)

1959년 10월 28일생. 1981년 고려대학교 전기공학과 졸업. 1989년 고려대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 여수대학교 전기 및 반도체 공학과 부교수.

Tel : (061) 659-3313

E-mail : buhmlee@yosu.ac.kr

문혁기(文赫基)

1975년 7월 15일생. 2001년 인천대학교 전기공학과 졸업. 2003년 인천대학교 전기공학과 대학원 석사졸업. 2003년 (주)비츠로시스 근무.

Tel : (032) 770-8434

Email : moon4746@hanmail.net

정현성(鄭鉉成)

1975년 10월 25일생, 2001년 인천대학교 전기공학과 졸업. 2003년 인천대학교 전기공학과 대학원 석사졸업. 2003년~한국수력원자력(주) 근무.

Tel : (032) 770-8434

E-mail : capjhs@incheon.ac.kr

조성린(趙成麟)

1961년 1월 10일생, 2002년 인천대학교 전자공학과 졸업. 2002년~현재 동대학원 석사과정, 한국전력공사 근무.

Tel : (032) 811-8397

E-mail : josli@kepco.co.kr