최대전력수송능력의 확률론적 평가법

정민화, 유수현, 이병준, 송길영
고려대학교 전기 · 전자 · 전파공학부

A Probabilistic Evaluation Method on Maximal Flow of Power Systems

M. H. Jeong, S. H. Yoo, B. Lee and K. Y. Song
School of Electrical Engineering, Korea University

Abstract - This paper presents an algorithm that evaluates the transfer capability of composite power systems using probabilistic approaches. The reliability indices calculated by using probabilistic method are expected maximal flow, expected transfer capability margin, and expected power not supplied. In this paper, a successive linear programming technique is used to evaluate transfer capability named maximal flow. Physical constraints considered in the maximal flow problem are the limits of load voltage, line overloading, and real & reactive power generation. Numerical results on IEEE RTS show that the proposed algorithm is effective and useful.

1. 서 론

최근, 전력수요의 급속한 증대와 함께 전원의 원격화 및 편재화, 부하의 수요집중화에 의한 송전설비의 장거리화 · 대용량화가 진행되고 있다. 이러한 전력계통의 환경하에서 계통의 수송능력을 정확히 평가해서 이를 계통계획의 기본자료로 활용하기 위해서는 계통계획단계에서 전원 및 송전망의 각종 운용상 제약 하에서 전력계통의 수송능력을 객관적이고 적정하게 평가할 수 있는 정량적인 지표를 산정하는 것이 중요하게 부각되고 있다.

전력계통의 최대전력수송능력(maximal flow)은 계통계획단계에서 주어진 발전용량이 계통의 각종 제약하에서 얼마나 많은 전력을 계통의 부하에 공급할 수 있는가를 나타내는 전력계통의 양적인 수송능력을 나타낸다. 그리고, 건전상태 및 각 송전선로의 상정사고에서 산정된 이러한 최대전력수송능력을 근거로 하여 계통여유도를 평가해서 하나의 확정론적인 수송능력 평가지표를 산출할 수 있다. 그러나, 최대전력수송능력을 계통신뢰도의 관점에서 정량적으로 평가하기 위해서는 이들 각 상정사고의 발생확률을 이용한 확률적 개념을 도입하여 계통계획단계에서 계통의 수송능력을 보다 현실적으로 취급할 필요가 있다.

전력계통에서 최대전력수송능력과 관련된 연구는 79년 L. L. Garver에 의해 부하공급능력(Load Supplying Capability : LSC)을 산정하는 논문[1]이 처음으로 발표된 이후, 이러한 수송능력을 이용하여 계통계획단계에서 복합계통의 신뢰도를 정량적으로 평가해서 이를 계통계획에 활용하는 방법론들이 제시되어 왔다[2-5]. 이러한 종래의 방법들은 최대전력수송능력을 구할 때 계통조건을 근사화시킨 직류조류법(모선전압을 1[pu]로 가정)을 사용하므로 계통의 무효전력이나 전압제약 등을 고려하지 않고 최대전력수송능력을 근사적으로 구하고 있다. 한편, 문헌[6-7]의 연구에서는 종래논문들의 근사계산 문제를 해결하기 위해 최대전력수송능력 산정문제를 교류조류계산법(뉴톤랩슨법)에 기반한 비선형 최적화문제로 정식화하고 이를 연속선형계획법(SLP)의 알고리즘으로 최적화하는 방법론을 제시하여 대규모 계통의 수송능력을 산정하는 방법론을 제시하였다. 그리고, 이러한 방법으로 산정된 수송능력은 각 상정사고를 전계 일률적으로 상정하는 원칙을 채용해서 그 중 최악의 산정결과를 주어진 계통의 수송능력으로 평가하기 때문에 계통계획단계에서 효율적으로 활용이 가능하나 그 상정사고의 발생가능 정도는 배제하므로 이를 보완하기 위한 확률론적 개념이 고려된 지수산정은 상당히 유용할 것으로 사료된다.

이러한 수송능력 산정문제를 효과적으로 다루기 위해, 본 연구에서는 각 상정사고의 고장확률과 최대전력수송능력과의 관계로 부터 계통의 최대전력수송능력의 기대치를 구하고 이를 확정론적인 수송능력과 비교하여 고찰하기로 한다. 또한, 이로부터 수송능력의 관점에서 본 공급지장전력 및 수송여력의 기대치, 공급지장확률 등의 계통신뢰도 지표를 구하는 방법론을 제안하여 확률론적 개념이 도입된 유연한 수송능력을 산정하기로 한다.

본 연구에서 제안한 최대전력수송능력의 확률론적 평가법을 IEEE RTS 24모선에 적용하여 확률론적 수송능력 평가의 유용성을 검증하였다.

2. 최대전력수송능력의 산정

2.1 문제의 정식화

최대전력수송능력 산정의 문제는 상정된 제약조건 하에서 목적함수를 최대로 하는 비선형 최적화문제로 구성된다. 이 최적화 문제의 목적함수는 다음 식(1)과 같이 발전단에서 송전계통을 거쳐 수송되는 부하단 유효전력의 합을 최대로 하는 것이다. 제약조건은 다음 식(2)~(6)과 같은 교류조류계산식, 발전기무효전력 계산식 등의 등호제약과 식(7)~(10)과 같은 선로조류제약, 모선전압제약, 발전기 유효 및 무효전력 출력제약 등의 부등호제약으로 구성된다.

■ 목적함수 : $\text{Max} \sum_{i=1}^{N_G+N_L} P_{Li}$ (1)

■ 제약조건

$$P_i = P_{Gi} - P_{Li} = V_i \sum_{j=1}^{N_G+N_L} [(G_{ij}\cos\theta_{ij} + B_{ij}\sin\theta_{ij})V_j] \quad i \in N_G+N_L-1 \tag{2}$$

$$Q_i = -Q_{Li} = V_i \sum_{j=1}^{N_G+N_L} [(G_{ij}\sin\theta_{ij} - B_{ij}\cos\theta_{ij})V_j] \quad i \in N_L \tag{3}$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li} = V_i \sum_{j=1}^{N_G+N_L} [(G_{ij}\sin\theta_{ij} - B_{ij}\cos\theta_{ij})V_j] \quad i \in N_G-1 \tag{4}$$

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{Gi} = \sum_{i=1}^{N_G+N_L} P_{Li} + P_{loss} \tag{5}$$

$$P_{Li} = P_{Li0}(1+R) \tag{6}$$

$$F_i^{min} \le F_i \le F_i^{max}, \quad i \in k \tag{7}$$

$$V_i^{min} \le V_i \le V_i^{max}, \quad i \in N_L \tag{8}$$

$$P_{Gi}^{min} \le P_{Gi} \le P_{Gi}^{max}, \quad i \in N_G \tag{9}$$

$$Q_{Gi}^{min} \le Q_{Gi} \le Q_{Gi}^{max}, \quad i \in N_G \tag{10}$$

여기서,

F_i^{max}, F_i^{min} : i 번째 선로조류의 상하한치
V_i^{max}, V_i^{min} : 모선전압의 상하한치
P_{Gi}^{max}, P_{Gi}^{min} : 발전기유효전력의 상하한치
Q_{Gi}^{max}, Q_{Gi}^{min} : 발전기무효전력의 상하한치
P_{Li0} : 초기 조류계산에서의 초기 부하수요
R : 부하 증가율
N_G, N_L, k : 각각 발전기모선, 부하모선, 선로의 총수

이러한 비선형 최적화문제를 연속선형계획법(SLP)으로 풀기 위한 최적화 문제로의 정식화는 다음 식(11)~(16)과 같다. 여기서, △는 증분량을 나타낸다.

■ 목적함수 : $\text{Max} \sum_{i=1}^{N_G+N_L} (P_{Li0} + \Delta P_{Li})$ (11)

■ 제약조건 :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q_L \\ \hline \Delta Q_G \\ \hline \Delta F_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J \\ \hline \frac{\partial Q_G}{\partial \theta} \quad \frac{\partial Q_G}{\partial V_L} \\ \hline \frac{\partial F_i}{\partial \theta} \quad \frac{\partial F_i}{\partial V_L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V_L \end{bmatrix} \qquad (12)$$

$$F_i^{min} \le F_{i0} + \Delta F_i \le F_i^{max}, \quad i \in k \qquad (13)$$
$$V_i^{min} \le V_{i0} + \Delta V_i \le V_i^{max}, \quad i \in N_L \qquad (14)$$
$$P_{Gi}^{min} \le P_{Gi0} + \Delta P_{Gi} \le P_{Gi}^{max}, \quad i \in N_G \qquad (15)$$
$$Q_{Gi}^{min} \le Q_{Gi0} + \Delta Q_{Gi} \le Q_{Gi}^{max}, \quad i \in N_G \qquad (16)$$

2.2 연속선형계획법에 의한 해법

다음 그림 1은 식(11)의 목적함수와 식(12)의 등식제약 및 식(13)~(16)의 부등식제약 조건으로 구성된 최적화 문제를 연속선형계획법에 의해 최적화하여 최대전력수송능력을 구하는 알고리즘[6][7]을 나타내고 있다. 그림 1의 단계적인 계산과정은 크게 초기상태 조류계산, LP 정식화, 최적화 계산(LP 계산), 교류조류계산 입력지정치의 수정, 수렴판정의 5단계로 구성된다.

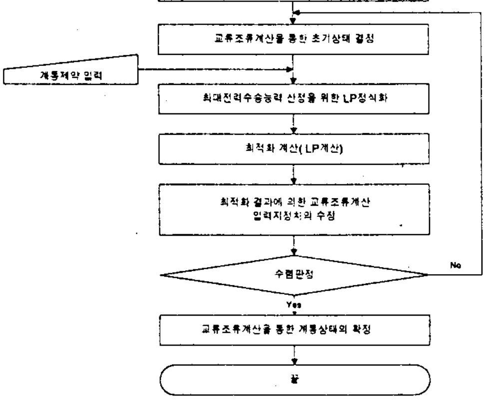

그림 1 연속선형계획법(SLP)을 사용한 최대전력 수송능력 산정의 흐름도

3. 수송능력에 대한 평가방법

전력계통의 신뢰도 평가방법은 확정론적 방법과 확률론적 방법으로 대별할 수 있다. 종래부터 전원부문에 있어서는 이러한 두가지 평가방법이 잘 정립되어 있어 일반적으로 LOLP, LOLE, EUE, 설비예비율 등의 신뢰도 지표들이 전원계획단계에서 일반적으로 사용되어 오고 있다. 한편, 전원 및 송전계통의 복합계통에 있어서는 일반적으로 확정론적 방법에 의한 계통신뢰도의 평가는 이미 널리 채용되고 있으나 확률론적 방법에 의한 평가는 대부분의 국가에서도 아직 본격적으로 수행되지 않고 있다[8-10]. 그것은 확정론적 방법은 평가과정이 명료하여 계획 입안과정의 업무에 표준적으로 사용할 수 있는 반면, 확률론적 방법은 고려해야 할 확률사상 및 계산과정 등의 복잡성 때문에 절대적이고 표준적인 지표를 설정하는 것이 단순하지 않기 때문이다. 이러한 현실을 감안할 때 전력계통의 수송능력 산정에 있어 완전한 확률론적 평가방법을 일시에 도입한다는 것은 이것에 의한 기존 계통계획 업무의 대폭적인 변경이 현실적으로 어려운 것이 현상이므로 그 실효성은 매우 적다고[10] 사료된다.

따라서, 본 연구에서는 전력계통의 수송능력 평가에 있어 확정론적 평가를 기반으로 하고 이와 병행하여 확률론적 개념이 도입된 유연한 수송능력의 평가를 위해 각 선로 상정사고의 발생 가능성을 확률적으로 채용하여 종래의 수송능력 산정방법에 대폭적인 변경을 수반하지 않고 보다 현실적으로 수송능력을 산정할 수 있는 평가방법을 제안하고자 한다.

3.1 확정론적 평가

계통계획단계의 신뢰도 기준은 대부분 n-1 상정사고를 기준으로 하고 있고 수급단면으로서는 피크시점을 채용하는 것이 일반적이다[8][9]. 따라서, 본 연구에서는 n-1 상정사고에 대한 최대전력수송능력을 구하여 n-1 상정사고를 기준으로 할 때 상정부하에 대한 수송능력을 평가하게 된다.

확정론적 수송능력의 평가방법으로서 본 연구에서는 계통여유도[4-7]를 계통의 부하단 최대전력수송능력에 대한 총부하 여력의 비율을 사용해서 총부하에 대한 선형지수로서 활용될 수 있는 계통여유율로 표현하기로 한다. 즉, 건전 또는 n-1 기준의 선로사고 상태를 나타내는 계통상태 i에서의 부하단 최대전력수송능력에 대한 수정된 계통여유율 $M_i(k)$는 식(17)과 같이 정의된다.

$$M_i(k) = \frac{MF_i - \sum P_L(k)}{MF_i} \times 100[\%] \qquad (17)$$

여기서,
MF_i : 계통상태 i 에서의 최대전력수송능력 [MW]
$\sum P_L(k)$: k 시점의 총부하 [MW]

이러한 방법으로 산정된 수송능력은 각 상정사고를 전계일률적으로 상정하는 원칙을 채용해서 그 중 최악의 산정결과를 주어진 계통의 수송능력으로 평가하기 때문에 계통계획단계에서 효율적으로 활용이 가능하나 그 상정사고의 발생가능 정도는 배제하기 때문에 이를 보완하기 위한 확률론적 수송능력의 지수산정은 상당히 유용할 것으로 사료된다.

3.2 확률론적 평가

전절의 확정론적 평가방법의 획일성을 보완하기 위해 n-1 상정사고에 대한 확률을 고려하여 수송능력에 대한 확률론적 평가방법을 제안하고자 한다. 본 연구에서는 각 상정사고에서의 고장확률, 최대전력수송능력, 상정부하 등의 관계로 부터 n-1 사고 시 수송능력의 확률론적 평가를 위해 최대전력수송능력 기대치, 공급지장전력 및

수송여력의 기대치, 공급지장확률 등의 수송능력에 대한 계통신뢰도 지표를 구하는 방법론를 제안하여 선로 상정사고에 대한 확률론적 개념이 도입된 보다 현실적인 수송능력을 산정하기로 한다.

■ 최대전력수송능력의 기대치

다음 식(18)은 건전상태를 제외한 상정한 n-1 선로사고에 대한 최대전력수송능력의 기대치를 의미하며 이것은 n-1 사고의 누적확률과 함께 수송능력의 확률적 값을 나타낸다.

$$\text{Expected } MF_i = \sum_{i=1}^{n} \left[\left(\frac{p_i}{\sum_{j=1}^{n} p_j} \right) \times MF_i \right] \tag{18}$$

여기서,

p_i : i 선로의 사고확률
$\sum p_j$: 상정한 n-1 선로사고의 누적확률
MF_i : i 선로사고 시의 최대전력수송능력
n : 상정된 선로의 수

■ 공급지장확률

다음 식(19)와 같이 표현되는 공급지장확률은 최대전력수송능력이 상정부하보다 작은 경우(공급지장)가 되는 상정사고 i 가 일어날 확률을 나타내며 결국, 이 지수는 공급지장이 일어나는 선로사고의 누적확률을 표현하고 있다.

$$\sum_{i=1}^{k} [p_{iout}] \tag{19}$$

여기서,

p_{iout} : 공급지장이 일어나는 i 선로의 사고확률
k : 선로사고 시 공급지장이 일어나는 선로의 수

■ 공급지장전력의 MW 기대치

다음 식(20)과 같이 표현되는 공급지장전력의 기대치는 수송능력이 상정부하보다 작은 상정사고에서의 공급지장전력의 확률에 대한 기대치이며 특히, 이 지수는 상정된 선로사고 수를 기준으로 산정하고 있으므로 대규모 계통에서의 중요 선택적 선로사고에 대한 확률론적 지수를 산정할 때 매우 유용하게 적용될 수 있다.

$$\sum_{i=1}^{k} \left[\frac{p_{iout}}{\sum_{j=1}^{n} p_{jout}} \times (P_L - MF_i) \right] \tag{20}$$

여기서,

P_L : 상정된 시간부하
p_{jout} : n개 선로 중에서 j 선로의 사고확률
P_L-MF_i : i 선로사고 시 공급지장전력 [MW]

■ 수송여력의 MW 기대치

다음 식(21)과 같이 표현되는 수송여력의 기대치는 수송능력이 상정부하보다 큰 상정사고에서의 수송여력의 확률에 대한 기대치이며 이 지수는 공급지장전력의 기대치와 같이 상정된 선로사고 수를 기준으로 수송여력을 평가할 수 있기 때문에 선택적 선로 상정사고에 대한 확률론적 지수로서 대규모 계통으로의 적용에 유용하다.

$$\sum_{i=1}^{m} \left[\frac{p_{iout}}{\sum_{j=1}^{n} p_{jout}} \times (MF_i - P_L) \right] \tag{21}$$

여기서,

p_{iout} : 공급여유가 일어나는 i 선로의 사고확률
m : 선로사고 시 수송여력이 있는 선로의 총수
MF_i - P_L : i 선로사고 시 수송여력 [MW]

즉, p_{iout}는 최대전력수송능력이 상정부하보다 큰 경우(공급여유)가 되는 상정사고 i 가 일어날 확률을 나타낸다.

4. 사례연구

4.1 사례계통의 특성

본 연구의 사례계통으로 사용하는 24모선 34선로의 IEEE 신뢰도 시험계통(RTS)[11]은 다음 표 2에 보인 바와 같이 총 10개의 발전기 모선으로 구성되어 있으며 발전계통은 총 3405[MW]의 설비용량을 가지고 있고 상정 최대부하는 2850[MW]이다. 여기서, 선로과부하가 수송능력에 영향을 미칠 수 있도록 선로의 정격용량을 일부 수정하였고 또한, n-1 상정사고는 각 선로의 1 루트를 완전히 제거하는 것으로 하였다.

표 1. IEEE RTS의 특성

모선수	선로수	발전기모선	설비용량	최대부하
24	34	10	3405 MW	2850 MW

4.2 수송능력 평가지수의 산정

그림 2는 RTS 계통의 각 선로 상정사고에 대한 부하단 기준의 최대전력수송능력을 산정하여 이를 크기순으로 재배열해서 표현한 것이다. 여기서, 사고누적확률은 각 선로의 공급지장빈도 및 사고지속시간 DATA[11]을 이용하여 시간단면에서의 고장확률을 계산한 다음 각 선로의 사고확률을 누적하여 나타낸 것이다.

그림 3은 총부하 $P_L(k)$를 1800[MW]에서 3400[MW]까지 상정해서 그림 2에서 보인 최대전력수송능력을 기준으로 계통여유율을 산정하여 수송능력을 확정론적으로 평가한 것이다. 이 그림에서는 계통여유율 산정에 가장 중요한 역할을 하는 최대전력수송능력 값의 하위 4개 상정사고와 이것을 비교하기 위해 건전상태 #0(3274MW)를 선택하여 계통여유율 곡선을 비교하고 있다.

이러한 n-1 상정사고에 대한 확정론적 평가방법에서는 수송능력은 최악의 경우인 선로사고 #10에 의해 결정되는 것이 일반적이므로 결국 실제 그 사고의 발생가능정도를 배제해서 수송능력을 상당히 엄격히 평가하게 되는 특징을 가지고 있다.

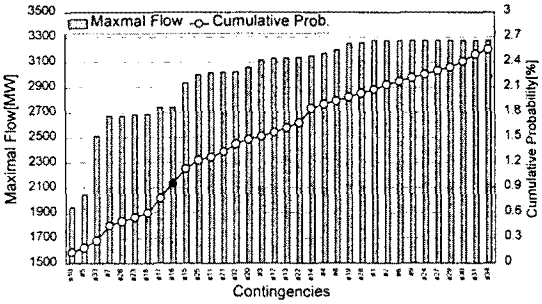

그림 2. 각 상정사고에 대한 최대전력수송능력 및 누적사고확률[%]의 분포

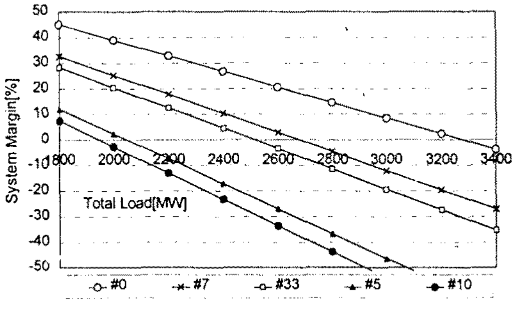

그림 3. 중대 상정사고에 대한 계통여유율

이러한 확정론적 평가방법을 보완하기 위해 계통여유율과 병행하여 RTS 계통의 최대부하 2,850MW 시점에 대한 n-1 상정사고의 확률을 고려해서 본 연구에서 제안하는 수송능력에 대한 각 확률론적 지수를 산정하여 정리하면 다음과 같이 요약할 수 있다.

■ 건전상태의 최대전력수송능력 : 건전상태일 확률은 97.45%이며 이 때 최대전력수송능력은 3274.1MW이다.

■ 선로사고 시 최대전력수송능력의 기대치 : 선로사고가 발생할 확률은 2.55%이며 이 때 최대전력수송능력의 기대치는 2923.1MW이다.

■ 공급지장확률과 공급지장전력의 MW 기대치 : 선로사고 중에서 공급지장이 발생하는 선로사고 들의 누적확률(공급지장확률)은 0.95%이며 이 때 그 공급지장전력의 기대치는 112.2MW이다.

■ 수송여력의 MW 기대치 : 선로사고가 발생해도 수송여력이 존재하는 선로사고 들의 누적확률은 1.60%이며 이 때 그 수송여력의 기대치는 185.3MW이다.

이러한 확률론적 지표로부터 결국 선로사고 시의 최대전력수송능력의 기대치 2923.1MW는 상정된 최대부하 2,850MW)에 수송여력의 기대치 185.3MW을 더해서 공급지장전력의 기대치 112.2MW를 뺀 값이 된다는 것을 알 수 있다. 또한, 이러한 공급지장전력 및 수송여력의 기대치를 각 상정사고 별로 표현하면 다음 그림 4와 같으며 이 그림에서 부(-)의 기대치는 공급지장전력, 정(+)의 기대치는 수송여력을 나타내고 있다. 따라서, 이러한 확률론적 지수들은 선로사고의 발생확률과 각각의 기대치로부터 계통계획단계에서 수송능력의 평가를 보다 유연하게 할 수 있는 정보를 제공하게 된다.

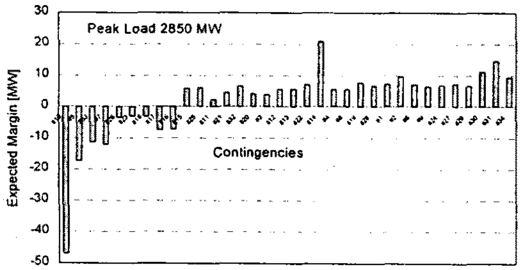

그림 4. 공급지장전력 및 수송여력의 기대치 분포

4.3 부하예측의 불확실성을 고려한 지수 산정

본 RTS 계통의 최대부하는 5% 표준편차(최대부하 2850MW에서 142.5MW의 편차)의 정규분포확률로 불확실성을 표현하는 것으로 가정되고 있다. 다음 표 2는 이러한 정규분포의 각 부하에 대한 확률론적 평가지표를 각각 산정한 결과를 요약한 것이며 표 3은 이 때 각 부하의 확률까지 고려하여 확률론적 평가지수를 산정한 결과를 정리한 것이다. 이러한, 부하예측의 오차까지 고려하면 사례계통은 n-1 선로사고 시 0.91% 확률의 공급지장전력 119.5MW와 1.64%확률의 수송여력 192.67MW를 기대치로 하는 확률론적 지수를 산정할 수 있다.

표 2. 부하변화에 대한 확률론적 평가지수 산정결과

표준편차	부하[MW]	공급지장 확률[%]	기대치 [MW]	
			공급지장전력	수송여력
-3	2422.5	0.187	32.9	533.9
-2	2565.0	0.273	45.1	403.5
-1	2707.5	0.598	64.1	279.9
0	2850.0	0.950	112.2	185.3
+1	2992.5	1.126	169.2	99.8
+2	3135.0	1.614	247.9	35.9
+3	3277.5	2.552	354.7	0

표 3. 부하예측오차를 고려한 확률론적 평가지수 산정

부하 확률	부하[MW]	공급지장 확률[%]	기대치 [MW]	
			공급지장전력	수송여력
0.006	2422.5	0.0011	0.20	3.20
0.061	2565.0	0.0167	2.75	24.61
0.242	2707.5	0.1447	15.51	67.74
0.382	2850.0	0.3629	42.86	70.78
0.242	2992.5	0.2725	40.95	24.15
0.061	3135.0	0.0985	15.15	2.19
0.006	3277.5	0.0153	2.13	0
1.000	2850	0.9117	119.55	192.67

5. 결 론

본 연구에서 제안한 수송능력의 평가방법에 관한 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 본 연구에서는 각 상정사고의 고장확률과 최대전력수송능력과의 관계로 부터 계통의 최대전력수송능력의 기대치를 구하고 이를 확정론적인 수송능력과 비교하여 고찰하였다.

(2) 또한, 이로부터 수송능력의 관점에서 본 공급지장전력 및 수송여력의 기대치, 공급지장확률 등의 계통신뢰도 지표를 구하는 방법론를 제안하여 확률론적 개념이 도입된 보다 효과적인 수송능력을 산정하였다.

(3) 한편, 최대전력수송능력의 산정은 계통의 교류조류제약, 발전기 유효 및 무효전력 제약, 선로 과부하제약, 전압제약 등과 같은 계통의 운용제약을 상세히 고려해서 수행하는 것으로 하였다.

(4) 마지막으로, 제안한 평가방법은 계통계획의 입안과정에서 대체안의 상호비교에 의한 선정 등은 확정론적 방법에 의해 수행하고 선정된 대체안의 신뢰도 분석 등은 확률론적 방법에 의해 수행하는 것을 목적으로 한다.

[References]

[1] L. L. Garver, P. R. Van Horne and K. A. Wirgau, "Load Supplying Capability of Generation-Transmission Networks", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-98, No. 3, May/June, 1979

[2] Philip R. Van Horne and Carol N. Schoenberger, ";TRAP : An Innovative Approach to Analyzing the Reliability of Transmission Plans", IEEE Trans. on PAS, Vol.PAS-101, No.1, January, 1982

[3] L. Chen, H. Suwa and 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, February 1991

[4] K. Takahashi and I. Kurihara, "A Concept on Adequacy Evaluation in Power System Planning", Proceedings of 11th PSCC, 1993

[5] I. Kurihara, K. Takahashi, B. Kermanshahi, "A New Method of Evaluating System Margin under Various System Constraints", IEEE Tans. on Power Systems, Vol. 10, No. 4, November 1995

[6] 한국전력공사 전원계획처, "전력계통 수송능력 진단을 위한 평가지수 개발에 관한 연구", 중간보고서, 1997. 10

[7] 국경수, 정민화, 남궁재용, 이병준, 송길영, "연속선형계획법을 사용한 전력계통의 최대전력수송능력 및 계통여유율의 산정", 대한전기학회 논문지, 제47권, 4호, 1998년 4월

[8] CIGRE WG 37.08, "Adequacy and Security of Power Systems in Planning Stage", Proceeding of CIGRE Symposium on Power Systems Reliability, Montreal, 1991

[9] 七原俊也, 外, "諸外國における電源・系統計劃の信頼度基準の現狀, 日本電學論 B, Vol. 114-B, No. 10, 1994

[10] 高橋一弘, 外, "基幹系統の電力輸送力に關する新しい評価方法", 日本電學論 B, Vol. 117-B, No. 1, 1997

[11] IEEE Committee Report, "IEEE Reliability Test System ", IEEE Trans. on PAS, PAS-98, 1979