

# 비선형 주·쌍대내점법을 이용한 부하공급능력의 산정에 기반한 전력수송능력의 평가

論 文

49A-4-3

## Evaluation of Transfer Capability based on Load Supplying Capability Calculation using Nonlinear Primal-Dual Interior Point Method

鄭 珉 和\* · 李 炳 峻\*\* · 宋 吉 永\*\*\*

(Min-Hwa Jeong · Byongjun Lee · Kil-Yeong Song)

**Abstract** - This paper presents a new methodology that can evaluate transfer capability of composite power systems from the adequacy point of view in power system planning stages. First of all, to evaluate practical load supplying capability, nonlinear optimization problems of maximum load supplying capability(MLSC) and economic load supplying capability(ELSC) are formulated and solved by nonlinear primal-dual interior point method. Here, physical constraints considered in the optimization problems are the limits of bus voltage, line overloading, and real & reactive power generation. Also, an evaluation method of transfer capability is presented based on margins calculated by the MLSC and ELSC. Especially, to evaluate transfer capability flexibly, simple indices such as expected MLSC, transfer capability margin, and power not supplied are respectively proposed by considering (N-1) line outage probability. Numerical results on IEEE RTS 24, IEEE 118, and IEEE 300 bus systems show that the proposed algorithm is effective and useful for power system planning stages.

**Key Words** : 계통계획, 부하공급능력, 전력수송능력, 수송능력지수, 비선형 주·쌍대 내점법

### 1. 서 론

최근, 전력시장의 규제완화·자유화의 진행에 의해 전력사업을 둘러싼 환경은 발전부분으로의 경쟁도입과 전력탁송 등 크게 변화해 가고 있다. 이러한 전력계통의 환경 하에서 계통의 수송능력을 합리적으로 평가해서 이것을 계통계획의 기본자료로 활용하기 위해서는 계통계획단계에서 전원 및 송전망의 각종 운용상 제약 하에서 전력계통의 부하공급능력을 다각적으로 산정해서 계획계통의 전력수송능력을 정량적으로 평가하는 문제가 매우 중요하게 부각되고 있다.

전력수송능력 산정과 관련된 연구는 1979년 부하공급능력을 산정하는 논문[1]이 처음으로 발표된 이후, 이러한 공급능력을 이용하여 계통계획단계에서 전력계통의 수송능력을 정량적으로 평가해서 이를 계통계획에 활용하는 방법론들이 제시되어 왔다 [2-5]. 이러한 종래의 방법들은 실용상 고속계산을 위해 직류조류법과 선형계획법을 기반으로 하고 있어, 계통의 무효전력이나 전압제약 등을 고려할 수 없는 단점을 가지고 있었다. 한편, 문헌 [6-8]의 연구에서는 최근의 계산기 고속화에 의해 부하공급능력 산정문제를 비선형 최적화문제로 정식화하고 이를 연속선형계획법의 알고리즘으로 최적화하는 방법론을 제시하여 대규모 실계통의 수송능력을 계획단계에서 적용가능한 계산속도

로 산정하는 방법론을 제시하였다. 그러나, 이 연구에서는 계통이 수송할 수 있는 최대전력만을 구하는 기본적인 방법론들로서 상정사고 해석시 필요한 최소부하차단의 개념이나 선로사고 확률에 의한 유연한 수송능력의 평가부분이 간과되어 있어 실용상 고려되어야 할 합리적인 수송능력의 평가과정이 필요하게 되었다. 특히, 문헌[7]의 연구에서는 비선형성이 강한 발전기무효전력 제약을 연속선형계획법에서 효과적으로 다루기 위한 방법론을 제시하였지만, 이러한 비선형 최적화 문제에서 해의 정확성, 수렴성, 계산시간 등을 향상시키기 위해서는 강인성 및 고속특성을 갖는 비선형 최적화법을 개발하여 전력수송능력의 최적화 문제에 적용하는 것이 요구되고 있다.

이러한 전력수송능력의 산정문제를 효과적으로 다루기 위하여 본 연구에서는 먼저, 계통이 수송할 수 있는 가장 낙관적인 공급능력에 해당하는 최대부하공급능력과 경제부하배분의 관점에서 공급능력을 평가하는 경제부하공급능력의 최적화 문제를 제시하고 이를 효율적인 비선형 주·쌍대내점법의 최적화 알고리즘을 적용하여 산정하도록 하였다. 한편, 전력수송능력의 평가는 최대부하공급능력과 경제부하공급능력에 기반해서 공급능력의 여유도로 평가하는 것으로 한다. 특히, (N-1) 선로 상정사고에 대한 최대부하공급능력의 평가에서는 선로고장확률에 기초하여 최대부하공급능력, 수송여유전력, 공급지장전력을 각각 기대치로 평가할 수 있는 전력수송능력 평가지수를 제안한다. 마지막으로, 본 연구에서 제안한 부하공급능력 및 전력수송능력의 산정법을 IEEE RTS 24모선, IEEE 118모선, IEEE 300모선에 적용하여 그 유용성을 검증하였다.

\* 正 會 員 : 高麗大 工學技術研究所 前任研究員·工博

\*\* 正 會 員 : 高麗大 電氣·電子·電波工學部 副教授·工博

\*\*\* 正 會 員 : 高麗大 電氣·電子·電波工學部 名譽教授·工博

接受日字 : 1999年 9月 16日

最終完了 : 2000年 3月 9日

## 2. 부하공급능력의 산정

계통계획단계에서 부하공급능력의 산정은 비선형 최적화 문제로서 정식화할 수 있다. 이것을 부하공급능력 문제라 하고 다음 2.1절 및 2.2절의 문제들을 총괄적으로 다루는 문제로 정의한다. 이 부하공급능력 문제는 상정된 계통의 각종 제약조건 하에서 목적함수를 최소로 하는 전력계통의 최적조류계산 문제 [9]를 적용하여 정식화할 수 있으며 다음과 같이 식(1)~식(3)의 형태로 간단히 표현할 수 있다.

$$\square \text{ 목적함수 : } \quad \text{Min } f(x) \quad (1)$$

$$\square \text{ 제약조건 : } \quad g(x) = 0 \quad (2)$$

$$h^{\min} \leq h(x) \leq h^{\max} \quad (3)$$

여기서,  $f(x)$ 는 부하공급능력을 구하기 위한 목적함수이고  $g(x)$ 는 전력조류방정식의 등식제약이며  $h(x)$ 는 선로조류제약, 발전기 유효 및 무효전력제약, 모선 전압제약 등의 부등식 제약을 나타낸다. 결국, 이러한 부하공급능력을 구하기 위한 최적조류계산 문제는 문제의 목적에 따라 발전기의 유효전력출력을 결정하는 발전력 배분문제가 된다.

### 2.1 최대부하공급능력 문제의 정식화

전력계통의 최대부하공급능력(Maximum Load Supplying Capability : MLSC)은 주어진 발전용량이 계통의 각종 제약 하에서 얼마나 많은 전력을 계통의 부하에 공급할 수 있는가를 나타내는 전력계통의 양적인 공급능력을 나타낸다. 여기서, 각 모선의 부하증가량은 초기 상정부하값(년 최대부하)의 비율을 일정하게 유지하면서 증가하는 것으로 하며 이것은 모든 부하단에서의 예비율을 균등하게 확보한 상태에서 계통전체의 공급능력을 평가하고자 하는 것이다.

부하의 증가를 나타내는 스칼라 파라메타  $\alpha$ 를 도입하여 정식화하면, 최대부하공급능력 문제의 목적함수와 제약조건식은 다음 식(4), (5)와 같이 벡터형식으로 표현할 수 있다.

$$\text{Min } f(x) = -\alpha \quad (4)$$

$$\text{s. t. } P(x) - P_G + P_L(1 + \alpha) = 0$$

$$Q(x) - Q_G + Q_L(1 + \alpha) = 0 \quad (5)$$

$$h^{\min} \leq h(x) \leq h^{\max}$$

여기서,

$P_G, Q_G$  : 발전기의 유효전력 및 무효전력 출력

$P_L, Q_L$  : 부하의 유효전력 및 무효전력의 지정치

한편, 상기와 같은 최대부하공급능력의 산정문제는 일반적으로 건전상태 및 (N-1) 선로상정사고에 대해 적용되게 된다. 이때, 상기 정식화는 균등예비율을 기준으로 공급능력을 산정하고 있으므로 만약 최대부하공급능력이 상정된 최대부하( $P_L$ )보다 작게 산정되는 엄격한 상정사고의 경우 부하단에서 균등공급지장이 일어나게 될 가능성이 있다. 따라서, 이러한 균등공급지장에 의한 산정결과와 악영향을 방지하고 공급능력을 최대부하의 관점에서 합리적으로 산정하기 위해서는 최대부하에 대한 공급지장전력을 최소화하는 산정방식의 도입이 요망된다.

공급지장을 나타내는 유효전력의 부하차단 변수벡터  $P_{LS}$ 를 도입하여 정식화하면, 이 공급지장전력의 최소화 문제는 다음 식(6), (7)과 같이 정식화되며 이 경우 목적함수인 식(6)은 계통전체의 공급지장을 최소화하는 것이 된다. 여기서,  $P_{LS}$ 에 대해서는  $0 \leq P_{LS} \leq P_L$ 의 부등식제약이 부가되며 무효전력의 부하차단량  $Q_{LS}$ 는  $Q_{LS} = P_{LS} \cdot (Q_L/P_L)$ 의 식이 성립하도록 한다.

$$\text{Min } f(x) = e^T P_{LS} \quad (6)$$

$$\text{s. t. } P(x) - P_G + P_L - P_{LS} = 0$$

$$Q(x) - Q_G + Q_L - Q_{LS} = 0 \quad (7)$$

$$h^{\min} \leq h(x) \leq h^{\max}$$

여기서,

$e$  : 목적함수를 스칼라량으로 만들어 주는 단위 열벡터

### 2.2 경제부하공급능력의 정식화

계통계획단계에서는 최대부하공급능력의 산정과 함께 부하배분의 경제성 개념을 포함시켜 공급능력을 현실적으로 고려할 필요가 있다. 즉, 일반적인 경제부하배분의 문제뿐만 아니라 전력시장 규제완화의 환경에서의 다양한 부하배분의 조건을 고려할 필요가 있다. 이 경우, 경제부하공급능력의 개념[8]은 계통혼잡이 일어나지 않게 되는 최대 부하수준을 나타내게 되며 경제부하공급능력 이상의 부하수준에서는 계통 혼잡비용이 수반됨을 의미하게 된다. 본 저자들은 이러한 개념을 기초로 해서 연구를 수행하고 있지만, 본 논문에서는 해석의 간단화를 위해, 일반적인 경제부하배분을 원칙으로 경제부하공급능력 문제를 다루기로 한다. 즉, 여기서 제시하는 경제부하공급능력(Economic Load Supplying Capability : ELSC)은 경제성 관점에서 전력계통의 공급능력을 나타내는 것으로 경제성을 기반으로 발전력 배분을 수행할 때 선로과부하 제약과 같은 계통운전 제약에 영향을 받지 않고 공급 가능한 최고 부하수준에서의 발전력 배분을 의미한다.

경제부하공급능력의 문제는 다음 식(8), (9)와 같이 간단히 표현된 경제부하배분문제를 이용해서 계산할 수 있다. 이 최적화 문제는 임의 지정부하수준( $\beta P_L$ )에 대한 일반적인 경제부하배분의 최적조류계산 문제이며 경제부하공급능력 문제는 이 경제부하배분 문제로부터 계통조류의 혼잡없이 최대로 공급가능한 부하수준  $\beta$ 를 결정하는 것이다. 본 연구에서는  $\beta$ 를 임의 지정부하부터 측차 증가시켜 나가면서 경제부하배분 문제를 푸는 방법으로 최대의  $\beta$  값을 산정하는 것으로 하였다.

$$\text{Min } f(x) = a + bP_G + cP_G^2 \quad (8)$$

$$\text{s. t. } P(x) - P_G + \beta P_L = 0$$

$$Q(x) - Q_G + \beta Q_L = 0 \quad (9)$$

$$h^{\min} \leq h(x) \leq h^{\max}$$

여기서,

$a, b, c$  : 2 차식으로 표현되는 발전기의 각 연료비 계수

### 2.3 비선형 주·쌍대내점법에 의한 해법

부하공급능력의 산정을 위한 전절의 비선형 최적화 문제는

비선형 주·쌍대 내점법(nonlinear primal-dual interior point method)[10-12]의 해법을 적용하여 최적화하는 것으로 하였다. 먼저, 주·쌍대 내점법을 적용하기 위해 전절 식(1)~식(3)으로 표현되는 부하공급능력 문제는 슬랙변수 벡터(l,u)∈R<sup>(r)</sup>를 각각 상하한의 부등식에 도입하여 부등식제약을 등식제약으로 변환한 후 배리어 파라미터 μ를 목적함수에 도입하면 다음 식(10)~식(14)와 같이 표현할 수 있다.

$$\min f(x) - \mu \sum \ln l - \mu \sum \ln u \quad (10)$$

$$\text{s. t.} \quad g(x)=0 \quad (11)$$

$$h(x) - l - h^{\min} = 0 \quad (12)$$

$$h(x) + u - h^{\max} = 0 \quad (13)$$

$$(l, u) \geq 0 \quad (14)$$

여기서, μ : μ > 0으로 내점법의 배리어 파라미터

상기 식의 최적화 문제에 대해 라그랑지 미정승수법을 적용하면 다음 식(15)와 같은 라그랑지 함수 L이 얻어진다.

$$L(x, l, u, \lambda, z, w) = f(x) - \mu \sum \ln l - \mu \sum \ln u - \lambda^T g(x) - z^T (h(x) - l - h^{\min}) - w^T (h(x) + u - h^{\max}) \quad (15)$$

$$\lambda \in R^{(n)}, \quad (z, w) \in R^{(r)}$$

여기서,

λ, z, w : 라그랑지 승수벡터

n, r : 각각 등식제약 및 부등식제약의 수

x, l, u와 라그랑지 승수벡터의 합성벡터를 p=(x, l, u, λ, z, w)라 하면, 최적화 문제는 라그랑지 함수 L(p)를 최소화하는 p를 찾는 것이 된다. 여기서, p\*를 최적점이라고 가정하면, 쿤터커 정리로부터 다음과 같은 식(16)~식(22)가 성립된다.

$$\frac{\partial L(p^*)}{\partial x} = L_x = \nabla f(x) - \nabla g(x) \cdot \lambda - \nabla h(x) \cdot (z + w) = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial L(p^*)}{\partial \lambda} = L_\lambda = g(x) = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial L(p^*)}{\partial z} = L_z = h(x) - l - h^{\min} = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial L(p^*)}{\partial w} = L_w = h(x) + u - h^{\max} = 0 \quad (19)$$

$$\frac{\partial L(p^*)}{\partial l} = L_l = LZ e - \mu e = 0 \quad (20)$$

$$\frac{\partial L(p^*)}{\partial u} = L_u = UW e + \mu e = 0 \quad (21)$$

$$(l, u, z) \geq 0 \quad w \leq 0 \quad \lambda \neq 0 \quad (22)$$

여기서, (L, U, Z, W)∈R<sup>(r×r)</sup>은 모두 대각행렬이며, e는 단위행렬이다.

다음에 식(16)~식(22)에 대해 뉴턴법을 적용하여 풀면 수정방정식은 다음 식(23)~식(28)과 같이 얻을 수 있다.

$$(\nabla^2 g(x)^T \cdot \lambda + \nabla^2 h(x) \cdot (z + w) - \nabla^2 f(x)) \Delta x + \nabla g(x) \cdot \Delta \lambda + \nabla h(x) \cdot (\Delta z + \Delta w) = L_{x0} \quad (23)$$

$$\nabla g(x)^T \cdot \Delta x = -L_{x0} \quad (24)$$

$$\nabla h(x)^T \cdot \Delta x - \Delta l = -L_{z0} \quad (25)$$

$$\nabla h(x)^T \cdot \Delta x + \Delta u = -L_{w0} \quad (26)$$

$$Z \cdot \Delta l + L \cdot \Delta z = -L_{l0} \quad (27)$$

$$W \cdot \Delta u + U \cdot \Delta w = -L_{u0} \quad (28)$$

여기서, L<sub>x0</sub>, L<sub>l0</sub>, L<sub>z0</sub>, L<sub>w0</sub>, L<sub>l0</sub><sup>μ</sup>, L<sub>u0</sub><sup>μ</sup>는 쿤터커 방정식의 오차(residual)가 된다.

상기와 같은 수정방정식은 부등식 제약에 의해 고차원 방정식이 되므로 이를 효율적으로 다루기 위해 이 부등식 제약에 관한 변수를 축약하도록 한다. 즉, 식(25)와 식(26)으로부터 Δl, Δu을 식(27)과 식(28)에 대입하고 이식의 Δz, Δw를 식(23)에 대입하면, 다음 식(29)와 같이 Δx와 Δλ만으로 축약된 수정방정식을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} H & J^T \\ J & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \psi(p, \mu) \\ g(x) \end{bmatrix} \quad (29)$$

여기서,

$$H \equiv (\nabla^2 g(x) \cdot \lambda + \nabla^2 h(x) \cdot (z + w) - \nabla^2 f(x)) + \nabla h(x) \cdot S \cdot \nabla h(x)^T$$

$$S \equiv U^{-1} \cdot W - L^{-1} \cdot Z$$

$$J \equiv \nabla g(x)^T$$

$$\psi(p, \mu) \equiv -L_{x0} + \nabla h(x) \cdot [U^{-1} \cdot (W \cdot L_{w0} - L_{u0}^{\mu}) - L^{-1} \cdot (Z \cdot L_{z0} + L_{l0}^{\mu})]$$

비선형 주·쌍대 내점법의 계산과정은 크게 초기치 설정, 상보갭(complementary gap) 계산, 수렴판정, 배리어 파라미터의 계산, 수정방정식의 계산, 최대스텝길이의 계산, 변수의 수정 등의 단계로 구성되며 이를 각 단계별로 간단히 설명하면 다음과 같다.

**단계 1 - 초기치 설정 :** 주·쌍대변수와 라그랑지 승수간 실행가능영역에서 시작되도록 초기치를 결정한다. 또한, 중심 파라미터 σ∈(0,1)을 결정한다.

**단계 2 - 상보갭 계산 :** 다음 식(30)과 같이 상보갭 C<sub>gap</sub>을 계산한다.

$$C_{gap} = \sum_{i=1}^r (l_i \cdot z_i - u_i \cdot w_i) \quad (30)$$

**단계 3 - 수렴판정 :** 수렴판정은 조류방정식의 최대오차(mismatch)와 상보갭이 수렴 한계치 내로 들어오면 종료하고 그렇지 않으면 다음 단계로 진행한다.

**단계 4 - 배리어 파라미터 μ의 계산 :** 부등식제약을 효과적으로 다루기 위해 도입되는 배리어 파라미터 μ를 다음과 같은 방법으로 계산한다.

$$\mu = \sigma \frac{C_{gap}}{2r} \quad (31)$$

**단계 5 - 수정방정식의 해를 계산 :** 식(29)에 의해 축약 수

정방정식을 계산해서 해를 구한다. 결국,  $\Delta x, \Delta \lambda$ 의 수정량을 구하고 이것을 이용하여  $\Delta l, \Delta u, \Delta z, \Delta w$ 의 수정량을 구한다.

단계 6 - 최대스텝 길이의 계산 : 단계 5에서 구한 각 변수의 수정량에 적용될 최대스텝 길이를 구하기 위해 다음과 같은 방법으로 ratio test를 수행한다.

$$\text{step 1} = 0.9995 \min \left\{ \min \left( \frac{-l}{\Delta l}, \frac{-u}{\Delta u} \right), 1 \right\} \quad (32)$$

$$\text{step 2} = 0.9995 \min \left\{ \min \left( \frac{-z}{\Delta z}, \frac{-w}{\Delta w} \right), 1 \right\} \quad (33)$$

$$(\Delta l, \Delta u, \Delta z) < 0 \quad \Delta w > 0$$

단계 7 - 변수의 수정 : 주·쌍대변수를 다음과 같은 식에 의해 갱신한다.

$$(x, l, u)^{k+1} = (x, l, u)^k + \text{step}_1 (\Delta x, \Delta l, \Delta u) \quad (34)$$

$$(\lambda, z, w)^{k+1} = (\lambda, z, w)^k + \text{step}_2 (\Delta \lambda, \Delta z, \Delta w) \quad (35)$$

수정 후 단계 2로 돌아가서 수렴할 때까지 상기의 계산과정을 반복한다.

### 3. 부하공급능력에 기반한 전력수송능력의 평가

#### 3.1 전력수송능력 평가의 개요

계통계획단계에서의 신뢰도 평가방법은 확률론적 방법과 확률론적 방법으로 대별할 수 있다. 그러나, 전력수송설비 계획을 위한 공급신뢰도 평가는 확률론적 방법에 의한 연구가 활발히 수행되고 있지만, 년 최대부하와 같은 하나의 수급단면에서 (N-1) 상정사고를 기준으로 한 확률론적 평가를 일반적으로 채용하는 경우가 많다[13-15]. 이러한 추세를 고려할 때 확률론적 평가법과 함께 확률론적 전력수송능력 평가법의 본격적 도입도 예상되지만, 현재 계획업무의 현실을 고려할 때 확률론적 평가법은 적용상 간단하고 실효성도 충분하므로 계통계획단계에서 하나의 유효한 평가법이라고 사료된다. 한편, (N-1) 상정사고를 전체 일률적으로 채용하는 확률론적인 평가법에서도 전력수송능력의 평가는 그 상정사고의 결과치 중 최악의 값을 채용하여 수송능력을 평가하게 되므로 이러한 획일적인 방법을 개선해서 전체 상정사고에 대한 수송능력의 결과를 종합적으로 평가할 수 있는 산정법이 요구되고 있다.

본 연구에서 제안하는 전력수송능력의 평가방법은 최대부하공급능력과 경제부하공급능력에 의한 확률론적 방법을 기반으로 해서 수행하는 것으로 한다. 우선, 계획계통의 건전상태에 대한 부하공급능력의 여유도 평가를 수행하여 부하공급능력의 적정성을 평가한다. 또한, 하나의 수급단면에서 (N-1) 상정사고에 대한 전력수송능력의 평가를 효율적으로 수행하기 위해 본 연구에서는 선로 상정사고의 발생 가능성을 확률적으로 채용하여 수송능력을 산정하는 평가방법을 제안하고자 한다.

#### 3.2 부하공급능력의 여유도 평가

부하공급능력의 여유도 평가는 최대부하공급능력과 경제부하공급능력의 값을 기본자료로 사용하고 계통에서 상정된 최대부하를 기준으로 해서 각각 전력수송능력의 여유도를 평가하는

것이다. 평가방법은 계통의 보수계획 및 주별 최대부하를 고려하기 위해 건전상태에 대해 주별로 수행하는 것으로 한다. 이러한 평가결과로부터 주별로 고려할 때 전체적인 전력수송능력이 적정한지를 대략적으로 검토하는 것으로 한다.

즉, 설비보수계획 및 최대부하 등에 의해 결정되는 주간 계통상태 k에서의 최대부하공급능력과 경제부하공급능력에 대한 여유도는 각각 식(36)과 식(37)과 같이 평가하는 것으로 한다. 여기서, 이 여유도 지표는 공급능력이 최대부하보다 큰 경우 1.0 이상, 반대로 최대부하보다 작은 경우 1.0 이하가 된다.

$$\square \text{ MLSC Margin}(k) = \frac{\text{MLSC}(k)}{P_{\text{peak}}(k)} \quad (36)$$

$$\square \text{ ELSC Margin}(k) = \frac{\text{ELSC}(k)}{P_{\text{peak}}(k)} \quad (37)$$

여기서,

k : 보수계획 및 부하 등에 의해 결정되는 주별 계통상태  
 $P_{\text{peak}}(k)$  : k 번째 주에서의 최대부하 [MW]

#### 3.3 최대부하공급능력의 기대치 평가

임의 수급단면(보통 년 최대부하)에서 (N-1) 선로 상정사고를 기준으로 한 확정론적인 평가법으로서 본 연구에서는 상정사고별 확률을 고려하여 각 상정사고에 대한 수송능력의 결과를 종합해서 평가하는 전력수송능력의 산정법을 제안하기로 한다. 즉, 선로 상정사고의 발생확률을 도입하여 (N-1) 상정사고에 대한 종합적인 전력수송능력을 나타낼 수 있는 지표를 산정하기 위해 각 선로 상정사고에 대한 선로고장확률, 최대부하공급능력, 상정부하 등을 사용하여 최대부하공급능력의 기대치, 수송여유전력 및 공급지장전력의 기대치 등의 수송능력지표를 제안한다. 여기서, 건전한 계통의 (N-1) 선로 상정사고에 대해서는 공급지장전력이 발생하지 않는 것이 일반적이지만, 중장기적 계획단면에서 급격한 수요증가까지를 상정한 다양한 중부하단면을 고려한다면 이 공급지장전력의 기대치 평가도 부하변동에 대한 계통계획의 안전측면에서 유효하게 적용할 수 있다고 사료된다. 즉, 수송여유전력 및 공급지장전력의 기대치는 상대적으로 정확한 예측이 어려운 부하수요에 대해 계획안의 적정성을 보조적으로 나타낼 수 있는 지표로서 활용되기를 기대한다.

#### □ 최대부하공급능력의 기대치

다음 식(38)은 상정한 (N-1) 선로상정사고에 대한 최대부하공급능력의 기대치를 나타낸다. (N-1) 선로사고 확률만을 고려하게 되므로 선로사고의 누적확률로 정규화하여 평가한다.

$$\sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{P_i}{\sum_{j=1}^n P_j} \right) \times \text{MLSC}_i \right] \quad (38)$$

여기서,

n : 상정된 선로의 총수  
 $P_i$  : i 선로의 사고확률  
 $\sum P_i$  : 상정된 선로사고의 누적확률  
 $\text{MLSC}_i$  : i 선로사고 시의 최대부하공급능력[MW]

#### □ 수송여유전력의 기대치

다음 식(39)와 같이 표현되는 수송여유전력의 기대치는 최대

부하공급능력이 상정부하보다 큰 상정사고에 대한 수송여유전력의 기대치를 나타내는 것이다.

$$\sum_{i=1}^m \left[ \frac{P_{iout}}{\sum_{j=1}^n P_j} \times (MLSC_i - P_L) \right] \quad (39)$$

여기서,

- m : 수송여유전력이 있는 선로의 총수
- $P_{iout}$  :  $MLSC_i > P_L$  인 경우의 i 선로의 사고확률
- $P_L$  : 상정부하
- $MLSC_i - P_L$  : i 선로사고 시 수송여유전력[MW]

□ 공급지장전력의 기대치

다음 식(40)과 같이 표현되는 공급지장전력의 기대치는 수송능력이 상정부하보다 작은 상정사고에 대한 공급지장전력의 기대치를 나타내는 것이다. 여기서, 이와 같이 공급지장전력이 발생하는 상정사상에 대해서는 2.1절의 공급지장 최소화 문제를 적용하여 최소의 공급지장전력을 산정해서 기대치를 구하게 된다.

$$\sum_{i=1}^l \left[ \frac{P_{iout}}{\sum_{j=1}^n P_j} \times (P_L - MLSC_i) \right] \quad (40)$$

여기서,

- l : 공급지장이 일어나는 선로의 총수( $l=n-m$ )
- $P_{iout}$  :  $MLSC_i < P_L$  인 경우의 i 선로의 사고확률
- $P_L - MLSC_i$  : i 선로사고 시의 공급지장전력 [MW]

결국, 상기의 각 지표는 다음 식(41)과 같은 관계를 갖는다.

$$\begin{aligned} \text{최대부하공급능력의 기대치} &= \text{최대부하} + \text{수송여유전력의} \\ &\text{기대치} - \text{공급지장전력의 기대치} \end{aligned} \quad (41)$$

한편, 계획대체안 평가에 있어서는 가능한 한 수송여유전력의 기대치가 크고 공급지장전력의 기대치가 0에 가까운 대체안을 선정하는 것이 바람직하다.

#### 4. 사례연구

##### 4.1 시험계통과 시뮬레이션 조건

본 연구의 시험계통으로 사용하는 24모선 38선로의 IEEE 신뢰도 시험계통(IEEE RTS)[16-17]은 총 3405[MW]의 설비용량을 가지고 있고 년 최대부하는 2850[MW]이다. 여기서, RTS 계통은 선로정격용량이 매우 크게 설정된 계통이므로 부하공급능력 산정 시 표준상태에서 과부하는 발생하지 않게 된다. 따라서, 본 연구의 수치적 검증에 위해 일부선로(선로번호 #10, #11, #23)의 정격용량을 그 선로의 원래 정격용량의 70% 정도로 수정해서 과혹한 상황을 상정하는 것으로 하였다. 또한, 계획단계의 문제이므로 부하모선의 전압제약은 0.9[p.u.]~1.1[p.u.], 발전기 모선의 전압제약은 0.98[p.u.]~1.02[p.u.]로 비교적 큰 값을 설정하였고 발전기 유효전력 및 무효전력 제약 등은 문헌 [16]의 값을 그대로 사용하는 것으로 하였다. 한편, 수렴조건은 상보갭( $C_{Gap}$ )과 조류방정식의 오차가 모두  $10^{-6}$  이내가 될 때 수렴하는 것으로 하였다.

##### 4.2 주별 부하공급능력의 여유도 평가

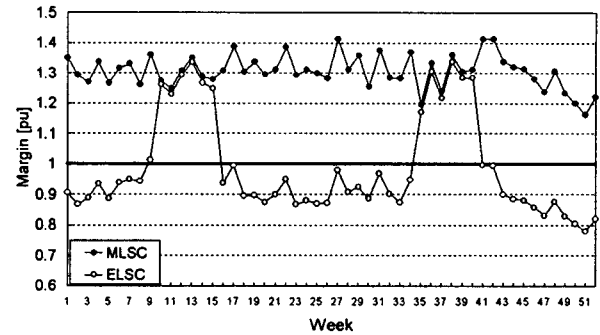


그림 1 주별 부하공급능력의 여유도

Fig. 1 The Margin of LSC for Weekly Peak Load

RTS 계통의 발전기 보수계획[17] 및 주별 최대부하를 고려하여 최대부하공급능력과 경제부하공급능력의 주별 여유도를 산정하면 다음 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

그림과 같이 최대부하공급능력에 대한 여유도는 대부분 주별 최대부하에 대해 20% 이상을 확보하고 있으며 최저의 여유도는 년 최대부하가 일어나는 51번째 주에서 나타나고 있다. 한편, 경제부하공급능력에 대해서는 13개 주에서만 실질적인 여유가 나타나고 나머지 39개 주에서는 최대부하보다 낮게 되어 경제운영이 불가능하게 된다.

최대부하공급능력에 대해서는 대부분의 주에서 선로번호 #11이 병목선로가 되고 있고 경제부하공급능력에 관해서는 선로 #11이나 #23이 병목선로가 되고 있다. 특히, 경제부하공급능력의 여유도가 1.0 이상의 13개 주에서는 병목선로가 모두 선로 #11인 것에 대해 여유도 1.0 이하의 39개 주에서는 병목선로가 모두 선로 #23이 되고 있다. 따라서, 이러한 결과로부터 경제부하공급능력의 여유도를 개선하기 위해서는 선로 #23의 보강을 우선하는 것이 중요하다는 것을 알 수 있다.

이러한, 주별 평가를 수행한 후 부하공급능력의 여유도가 가장 작게 되는 51번주의 년 최대부하를 기준으로 (N-1) 상정사고에 대한 전력수송능력의 평가를 수행한다.

##### 4.3 상정사고에 대한 최대부하공급능력의 산정

그림 2는 RTS 계통의 연간 최대부하의 수급단면에서 각 선로 상정사고에 대한 최대부하공급능력을 산정하여 이를 크기순으로 재배열해서 표현한 것이다. 그림과 같이 부하단 균등에비율에 기초하여 최대부하공급능력을 산정하면 최대부하 2850[MW] 이하인 하위 2개 상정사고는 균등 공급지장에 의해 최대부하에 대해 매우 작은 공급능력밖에 갖지 못하는 것을 알 수 있다. 다음 표 1과 같이 이를 공급지장 최소화 과정을 통해

표 1 2개 상정사고에 대한 공급지장 최소화 산정결과

Table 1 The Results of Minimum Loss of Load for Two Contingencies

상정 사고	MLSC [MW]	공급지장량 [MW]	Min Loss of Load [MW]	공급지장량 [MW]
#10	2046.8	803.2	2810.8	39.2(1.37%)
#5	2515.3	334.7	2834.0	16.0(0.56%)

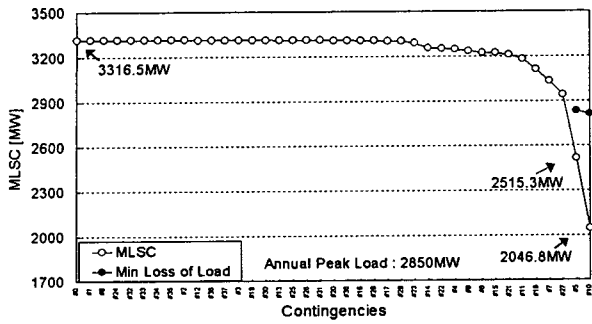


그림 2 각 상정사고에 대한 최대부하공급능력  
Fig. 2 MLSC for (N-1) Contingencies

다시 공급능력을 산정한 경우(Min Loss of Load) 대부분 최대부하 2850[MW]에 근접한 공급능력이 산정되게 된다.

이로부터 공급능력이 최소가 되는 경우는 선로사고 #10에 의한 것이며 결국, 이러한 (N-1)상정사고에 대한 확정론적 평가방법에서는 수송능력은 최저 공급능력의 경우인 선로사고 #10에 의해 결정되게 된다.

4.4 최대부하공급능력의 기대치 평가

확률적 기대치를 도입한 수송능력 평가를 위해 (N-1) 상정사고의 고장확률을 고려해서 본 연구에서 제안하는 수송능력에 대한 각 기대치를 산정하기로 한다. 여기서, 선로 고장확률은 각 선로의 연간 공급지장빈도 및 사고지속시간을 이용하여 구하는 것으로 하고 이 때의 누적고장확률은 2.54%가 된다.

다음 그림 3은 각 선로 상정사상에 대한 최대부하공급능력을 그 상정사상의 발생확률을 고려해서 비례적으로 나타낸 것이다. 여기서, (N-1) 상정사상에 대해서만 기대치를 구하기 위해 가로축은 누적확률 2.54%에 의해 정규화하고 있다.

그림 3의 결과로부터 본 연구에서 제안하는 각 평가지표는 다음과 같이 산정된다.

□ 최대부하공급능력의 기대치 :

그림에서 최대부하공급능력 값에 대한 전체면적을 나타내는 값으로 식(38)에 의해 3204.0[MW]가 산정된다.

□ 수송여유전력의 기대치 :

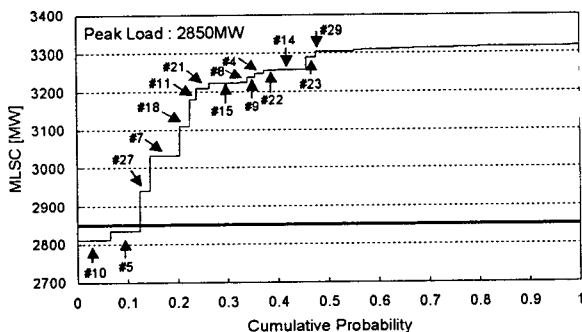


그림 3 각 상정사고에 최대부하공급능력 기대치  
Fig. 3 The Expected MLSC for (N-1) Contingencies

그림에서 최대부하 2850[MW] 보다 큰 36개 상정사상의 수송여유전력의 면적이 되며 그 기대치는 식(39)에 의해 357.5 [MW]가 산정된다.

□ 공급지장전력의 기대치 :

그림에서 최대부하 2850[MW] 보다 작은 2개 상정사상의 공급지장전력 면적이 되며 그 기대치는 식(40)에 의해 3.5 [MW]가 산정된다.

이러한 상기의 지표치는 식(41)을 만족하고 있다. 즉, 선로상정사고 시의 그림 3의 면적에 해당하는 최대부하공급능력의 기대치 3204.0[MW]는 상정된 최대부하 2850[MW]에 수송여유전력의 기대치 357.5[MW]를 더해서 공급지장전력의 기대치 3.5[MW]를 뺀 값이 된다는 것을 알 수 있다.

선로 상정사고확률에 기반한 지표치는 선로사고의 발생확률과 각각의 기대치로부터 계통계획단계에서 수송능력의 평가를 보다 유연하게 할 수 있는 정보를 제공하게 된다. 즉, 계통계획단계의 선로보강계획이 그림 3에서 공급지장 및 작은 수송여유전력을 갖는 상정사상을 중심으로 이루어진다면 결과적으로 공급지장이 해소되는 동시에 전체적인 기대치가 평활하게 되어 상정사상 발생확률의 관점에서 바람직한 전력수송능력을 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

4.5 계산특성의 검토

본 연구의 비선형 주·쌍대 내점법에 의한 부하공급능력의 산정에 대한 대규모 계통으로의 적용성을 검토하기 위해 IEEE 118모선과 300모선의 사례연구를 추가하였다. 한편, 이 시험계통은 해석범위를 한정하여 순수한 계산특성 면에서 검토를 수행하는 것으로 하여 필요한 제약들은 적정하게 부과하는 것으로 하였다.

표2는 이러한 IEEE의 대규모 시험계통을 이용해서 본 연구에 적용된 최적화 문제의 계산특성을 뉴턴반복수와 계산시간에 대해 나타낸 것이다. 계통조건에 의해 계산특성은 다소의 차가 있을 수 있지만, 어느 경우에도 주·쌍대내점법에 의한 계산법은 매우 안정한 계산특성을 나타내고 있고 계획단계에서 실용적으로 적용가능한 계산특성임을 확인할 수 있다.

표 2 대규모 계통에 대한 계산특성

Table 2 Number of Iterations and CPU Time for Large-Scale Power Systems

IEEE 계통명	경제부하배분		최대부하공급능력	
	반복수	시간(sec)	반복수	시간(sec)
118 bus	11	0.49	12	0.60
300 bus	13	1.40	20	2.15

주) SUN Ultra Sparc 5(270MHz)를 사용

5. 결 론

본 연구에서는 계통계획단계에서 전력수송능력 산정문제를 효과적으로 다루기 위하여 비선형 최적화법에 의한 최대부하공급능력과 경제부하공급능력을 산정하고 이를 기반으로 해서 전력수송능력의 산정에 관한 연구를 수행하였다.

부하공급능력의 산정문제는 계통의 운용제약을 고려해서 모

두 비선형 최적화 문제로 정식화하고 이를 비선형 주·쌍대 내점법의 최적화 알고리즘에 의해 구할 수 있도록 하였다. 전력수송능력의 평가문제에 있어서는 부하공급능력의 산정값에 기반해서 여유도 평가를 수행하였고 또한, (N-1) 선로 상정사고의 선로고장확률에 기초하여 최대부하공급능력, 수송여유전력, 공급지장전력을 각각 기대치로 평가할 수 있는 전력수송능력의 평가지표를 제안하였다. 마지막으로, IEEE RTS 계통에서의 수치적 검토를 통해 비선형 주·쌍대 내점법에 의한 부하공급능력의 산정과 전력수송능력에 관한 각 지표들의 산정결과를 검토하여 본 연구의 적용성 및 유용성 등에 대해 검증하였다.

본 연구의 결과는 전력계통의 유통계획, 전원개발계획, 보수계획 등과 같은 다양한 계획문제에 대해 지원 Tool로서 폭 넓게 적용될 수 있을 것으로 사료되며 향후에는 전력시장의 규제완화 환경에 있어서의 전력수송능력의 평가법과 확률론적 방법에 기반한 전력수송능력의 평가에 관한 문제에 대해서도 계속 연구해 나갈 계획이다.

### 참 고 문 헌

- [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, 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, 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, 1991
- [4] K. Takahashi, I. Kurihara, "A Concept on Adequacy Evaluation in Power System Planning", Proceedings of 11th PSCC, 1993
- [5] I. Kurihara, K. Takahashi, and B. Kermanshahi, "A New Method of Evaluating System Margin under Various System Constraints", IEEE Tans. on Power Systems, Vol. 10, No. 4, 1995
- [6] K. Y. Song, B. Lee, M. H. Jeong, J. Y. Hwang, and Y. C. Shin, "Evaluation of Maximal Flow in Korea Electric Power System", 平成10年電氣學會電力・エネルギー部門全國大會論文集, 論文 No. 2, 1998
- [7] 정민화, 유수현, 이병준, 송길영, "발전기무효전력 제약을 고려한 전력계통의 최대전력수송능력의 산정", 대한전기학회논문지, 제 47권, 8호, 1998년 8월
- [8] 한국전력공사 전원계획처, "전력계통 수송능력 진단을 위한 평가지수 개발에 관한 연구", 최종보고서, 1998년 11월
- [9] D. I. Sun, B. Ashley, B. Brewer, A. Hughes, and W. F. Tinney, "Optimal Power Flow by Newton Approach", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-103, No. 10, 1984
- [10] S. Granville, "Optimal Reactive Dispatch Through Interior Point Methods", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, No. 1, 1994
- [11] Y.C. Wu, A. S. Debs, and R. E. Marsten, "A Direct Nonlinear Predictor-Correct or Prima-Dual Interior Point Algorithm for Optimal Power Flows", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, No. 3, 1994
- [12] H. Wei, H. Sasaki, J. Kubokawa, and R. Yokoyama, "An

Interior Point Nonlinear Programming for Optimal Power Flow Problems with A Novel Data Structure", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 13, No. 3, 1998

- [13] CIGRE WG 37.08, "Adequacy and Security of Power Systems in Planning Stage", Proceeding of CIGRE Symposium on Power Systems Reliability, Montreal, 1991
- [14] 七原俊也, 栗原有郁夫, "諸外國における電源・系統計劃の信頼度基準の現状, 日本電氣學會論文誌 B, Vol. 114-B, No. 10, 1994
- [15] 高橋一弘, 外, "基幹系統の電力輸送能力に關する新しい評價方法", 日本電氣學會論文誌 B, Vol. 117-B, No. 1, 1997
- [16] IEEE Committee Report, "IEEE Reliability Test System", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-98, No. 6, 1979
- [17] R.N. Allan, R. Billinton, and N.M.K. Abdel-Gawad, "The IEEE RTS-Extensions to and Evaluation of the Generating System", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. PWRs-1, No. 4, 1986

### 저 자 소 개



정민화(鄭珉和)

1965년 2월 22일생. 1987년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동대학원 전기공학과 졸업(공학). 1987년~1992년 삼성전자 종합연구소 근무. 1998년 10월~2000년 3월 일본 히로시마대 외국인연수생. 1999년4월~현재 고려대 공학기술연구소 선임연구원.

Tel : 02-3290-3697

E-mail : minhwa@elec.korea.ac.kr

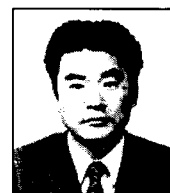


이병준(李炳峻)

1961년 7월 16일생. 1987년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 미국 Iowa State Univ. 전기공학과 졸업(석사), 1994년 동 대학원 졸업(공학). 1994년~1995년 Iowa State Univ. Post Doc. 1995년 ~1996년 일본 미쓰비시 전기 근무. 현재 고려대 전기·전자·전파공학부 부교수.

Tel : 02-3290-3242, Fax : 02-921-1325/0544

E-mail : leeb@elec.korea.ac.kr



송길영(宋吉永)

1934년 5월 15일생. 1953년 서울대 공대 기계학과 중퇴. 1958년 일본 무사시대 전기공학과 졸업(석사). 1967년 동 대학원 박사과정 졸업(공학). 1970~1974년 과학기술처 중앙전자 계산소장, 1974~1976년 한양대 전기공학과 교수, 현재 고려대 고대 전기전자전파공학부 교수

Tel : 02-3290-3216