

전압제약을 고려한 전력계통의 최대전력수송량 산정

정민화* · 남궁재용* · 오광해** · 이병준* · 송길영*
* 고려대학교 전기·전자·전파공학부 ** 한국철도기술연구원

Evaluation of Load Supplying Capability Considering Voltage Constraint in Composite Power System

M.H. Jeong* · J.Y. Namkung* · K.H. Oh** · B.J. Lee* · K.Y. Song*
* Korea University ** Korea Railroad Research Institute

Abstract - This paper presents an algorithm that evaluates load supplying capability(LSC) considering voltage constraint in composite power systems. To evaluate the LSC considering the voltage constraint, we apply tangent vector approach using an enhanced power flow method based on continuation algorithm. The validity and effectiveness of the proposed method is confirmed through the simulation of a model system.

1. 서 론

전압제약을 고려한 최대전력수송량 산정이란 전원 및 송전선로의 상하한 제약과 부하모선 전압의 상하한 제약 하에서 전력계통이 얼마나 많은 전력을 전원에서 부하까지 수송할 수 있는가를 계산하는 것이다.

최근, 사회생활의 고도화와 정보사회의 진보로 인한 전력수요의 급속한 증대와 함께 대도시로의 수요집중 경향이 강해지고 있고 동시에 전원의 원격화, 편재화에 의한 송전설비의 장거리화·대용량화가 진행되고 있다. 또한, 계통의 규모가 증가하고 그 구성이 복잡해짐에 따라 계통사고의 빈도가 증가하고 사고가 계통에 미치는 영향이 심각해지고 있는 추세이며 검토해야 할 조류상황도 점차 다양해지고 있다.

그러므로, 계통계획단계에서 전력계통의 능력을 정확히 평가해서 이를 계통계획의 기본 자료로 활용하기 위해서는 급속히 증가하고 있는 전력부하에 대해 전원 및 송전망의 운용상 제약과 부하단의 전압제약과 같은 계통의 실제적인 제약 하에서 전원에서 발전된 전력이 부하까지 얼마나 많이 전달될 수 있는가를 나타내는 전력계통의 수송능력(최대전력수송량)을 양적으로 평가하는 것이 필요하게 되었다.

전력계통에서 최대전력수송량의 산정과 관련된 연구는 79년 L. L. Garver가 최대전력수송량(Load Supplying Capability : LSC)을 구하는 논문^[1]을 처

음으로 발표한 이래 전력계통의 계획단계에서 최대전력수송량을 산정해서 신뢰도를 평가하는 방법론들이 제안되어져 왔다^{[2][3]}. 그러나, 이러한 종래의 방법들은 최대전력수송량을 구할 때 모든 모선전압이 1PU라고 가정된 직류조류법에 기반하여 전력조류제약을 다루고 있기 때문에 전력계통의 가장 중요한 요소 중의 하나인 모선의 전압제약을 고려하지 못하고 있다.

이와같이 최대전력수송량을 구할 때 전압제약을 고려하지 못한 종래 논문들의 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 전력계통의 수송력을 실질적으로 평가하기 위해 각 선로의 1회선 상정사고 하에서 전압제약을 고려한 최대전력수송량을 구하는 방법론을 제시한다. 이를 위해, 본 연구에서는 Continuation 알고리즘^[4]으로부터 개발된 전력조류계산법을 이용하여 전력조류계산 시 별도의 계산과정 없이 선형의 전압방정식을 근사하기 위한 접선벡터(Tangent Vector)를 구하고 이를 최대전력수송량을 구하는 선형계획법의 최적화 문제에 적용할 수 있도록 하였다.

본 연구에서 제안한 전력계통의 최대전력수송량 산정의 알고리즘을 IEEE 신뢰도 시험계통(RTS)에 적용하여 그 유용성을 검증하였다.

2. 접선벡터를 이용한 모선전압 근사법

최대전력수송량을 구하는데 있어 전압제약을 고려하기 위해 계통 전압의 고속근사추정방법을 제안한다. 우선, Continuation 알고리즘에 기반한 전력조류계산식을 재구성하고 이로부터 구해지는 접선벡터를 이용한 전압근사법을 개발하였다.

2.1 Continuation 알고리즘에 기초한 접선벡터의 유도

전력조류에 대한 Continuation 기법은 자코비안 of Singularity를 피하기 위해 전력조류방정식을 변형시키고 국부적으로 매개변수화된 Continuation 기법에 적용한 것이다. 즉, 종래의 전력방정식에 부

하 파라미터 λ 를 포함시켜 식(1)과 같은 확대 전력조류방정식을 구성한다.

$$F(\delta, V, \lambda) = 0 \quad (1)$$

여기서, δ : 모선전압의 위상각 벡터

V : 모선전압 크기의 벡터

일반적으로 F 의 차원(dimension)은 $2n_{pq} + n_{pv}$ 이며 여기서 n_{pq} 과 n_{pv} 는 각각 PQ모선과 PV모선의 개수이다. 식(1)에 대해 미분을 취하여 다음 식(2)를 얻고 식(3)과 같이 접선벡터(Tangent Vector)를 정의한다.

$$dF(\delta, V, \lambda) = F_{\delta} d\delta + F_V dV + F_{\lambda} d\lambda = 0 \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} F_{\delta} & F_V & F_{\lambda} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = 0 \quad (3)$$

식(3)의 좌변에서 편미분 행렬은 하나의 열(F_{λ})이 확장된 종래의 전력조류 자코비안이며,

$[d\delta \ dV \ d\lambda]^T = t$ 는 구해야 할 접선벡터이다.

이제 식(3)의 접선벡터에 비영의 크기를 부여하기 위해서 식(3)을 수정하여 다음과 같은 식(4)를 구성한다.

$$\begin{bmatrix} F_{\delta} & F_V & F_{\lambda} \\ \underline{e}_k \end{bmatrix} [t] = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서, \underline{e}_k 는 k 번째 요소만을 1로 하고 나머지 요소가 모두 0의 값을 갖는 행벡터이다. 만약, 인덱스 k 가 적당하게 선택되면, 접선벡터의 k 번째 요소는 $t_k = \pm 1$ 으로 설정되기 때문에 접선벡터는 0이 아닌 norm을 가지며 전압안정도 한계점에서도 확대 자코비안은 특이성(Singularity)의 문제를 회피할 수 있다. 결국 접선벡터는 식(4)의 선형방정식의 해로써 결정된다.

2.2 접선벡터에 의한 모선전압의 근사계산식

식(4)의 접선벡터(Tangent Vector)는 부하 파라미터의 변화($d\lambda$)에 대한 모선전압 크기의 변화(dV_i)를 나타내는 감도이다. 이때 $d\lambda$ 는 각 dV_i 에 대하여 동일하기 때문에 부하변화에 대한 전압감도는 $dV_i / d\lambda$ 가 된다.

따라서, 부하증감에 따른 계통전압은 다음 식(5)와 같이 근사화 시킬 수 있다.

$$\begin{aligned} V_i^{cal} &= V_i^{base} + \frac{dV_i}{d\lambda} \cdot \Delta\lambda \\ &= V_i^{base} + \frac{dV_i}{d\lambda} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta P_{Li} \\ &= V_i^{base} + \frac{dV_i}{d\lambda} \cdot \sum_{i=1}^n [P_{Li}^{cal} - P_{Li}^{base}] \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, V_i^{base} : 기준 Case에 대한 부하모선의 전압

V_i^{cal} : 접선벡터에 의해 구해지는 부하모선의 전압

$dV_i/d\lambda$: 접선벡터 값

$\Delta\lambda$: 총 부하변화량

P_{Li}^{cal} : 부하변화 후의 부하모선의 부하량

P_{Li}^{base} : 기준 Case에 대한 부하모선의 부하량

3. 전압제약을 고려한 최대전력수송량의 계산

최대전력수송량 산정법에 전압을 고려하기 위해 본 연구에서는 2절에서 설명한 전력조류계산법을 이용하여 접선벡터를 산출하고 이로부터 전압값을 근사해서 선형계획법의 최적화 문제에 적용하는 방법으로 부하모선의 전압제약을 고려하는 새로운 최대전력수송량의 산정법을 개발한다.

3.1 정식화

3.1.1 목적함수

목적함수는 최대전력수송량으로 다음 식 (6)과 같이 운전중인 모든 발전기의 출력의 합을 최대로 하는 것이다.

$$LSC = \text{Max} \sum_k G_k, \quad k=1, \dots, K \quad (6)$$

여기서, G_k : K 개의 발전기가 존재하는 모선 중 k 번째 모선에서의 발전기 출력

3.1.2 제약조건

최대전력수송량을 구하는 최적화 문제의 제약조건은 다음 식(7), 식(8)과 같은 회로방정식 및 수급밸런스 제약의 등호제약과 식(9)~식(12)와 같은 선로조류제약, 모선전압제약, 발전기 출력제약, 전압위상각제약 등의 부등호 제약으로 구성된다.

㉑ 회로방정식 : $Y \theta = G - L$

$$f = A \theta \quad (7)$$

㉒ 수급밸런스 : $\sum_k G_k = \sum_i L_i$
 $L_i = \beta_i \times \sum_k G_k \quad (8)$

㉓ 선로조류 제약 : $f^{\min} \leq f \leq f^{\max} \quad (9)$

㉔ 모선전압 제약 : $V^{\min} \leq V \leq V^{\max} \quad (10)$

㉕ 발전기출력제약 : $G^{\min} \leq G \leq G^{\max} \quad (11)$

㉖ 전압위상각제약 : $\theta^{\min} \leq \theta \quad (12)$

여기서, Y : 어드미턴스행렬

θ : 전압위상각벡터

f : 선로조류벡터

A : node/link 접속행렬

G_k : k 모선의 발전기 출력

- L_i : i 모선의 부하수요
- β_i : i 모선의 총 부하에 대한 부하비율
- f^{\min} : 선로조류 하한치 벡터
- f^{\max} : 선로조류 상한치 벡터
- V^{\min} : 모선전압의 하한치 벡터
- V^{\max} : 모선전압의 상한치 벡터
- G^{\min} : 발전기모선의 출력하한치 벡터
- G^{\max} : 발전기모선의 출력상한치 벡터
- θ^{\min} : 전압위상각 하한치 벡터

3.2 해법

식(6)의 목적함수와 식(7)~식(12)의 제약조건으로 구성된 선형문제를 최적화하여 최대전력수송량을 구하는 알고리즘을 단계적으로 설명하면 다음 그림 1과 같다.

- STEP 1** 계통자료 입력
- STEP 2** DC 조류계산식 및 선로제약 등의 선형 제약을 고려해서 최대전력수송량 계산
- STEP 3** 상기 STEP 2에서 최적화된 계통조건을 입력으로 해서 모선전압 및 접선벡터 계산
- STEP 4** 모선전압의 체크 : 각 부하모선의 전압이 지정된 한계값을 위반하면 다음 STEP 5로 가고 지정된 한계값 이내에 있으면 STEP 6으로 간다.
- STEP 5** 위반된 모선의 전압값과 접선벡터를 이용하여 새로운 최대전력수송량 계산
- STEP 6** 모든 상정사상을 고려하였으면 계산을 종료하고 그렇지 않으면 다음 상정사상을 고려하여 Step 2로 돌아간다.

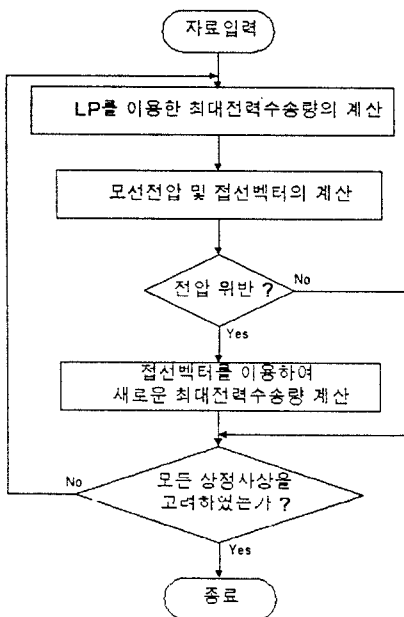


그림 1. 계산 흐름도

4. 사례연구

4.1 모델계통의 특성

본 연구의 모델계통은 24모선 34선로의 IEEE 신뢰도 시험계통으로서 총 32기로 구성된 발전계통은 총 3405[MW]의 설비용량을 가지고 있다.

여기서, 선로 과부하에 제한되는 최대전력수송량의 해석을 용이하게 하기 위해 선로의 정격용량을 일부수정하였고 계통 전체선로의 1회선 상정사상을 고려하기 위하여 모든 선로는 2회선으로 구성된 것으로 가정하였으며 각 부하모선의 부하비율과 역율은 초기 기준상태의 값(역율일정)을 유지하는 것으로 하였다.

4.2 적용결과

시험계통의 건전상태 및 모든 선로의 1회선 상정사상(34개)에 대해 전압제약을 고려하지 않은 최대전력수송량을 선형계획법(LP)의 최적화에 의해 구하면 표 1과 같은 결과를 얻을 수 있다. 이 최대전력수송량은 모든 모선의 전압을 1.0 Per Unit로 가정한 직류조류식을 기초로 한 것이므로 전압에 대한 고려가 반드시 수행되어야 한다.

각 상정사상에 대해 표 1의 최대전력수송량을 갖는 계통조건을 기초로 하여 본 연구에서 도입한 전력조류계산법을 이용해서 각 상정사상의 부하모선 전압값 중에서 최소값을 갖는 모선전압과 그 모선의 접선벡터를 구하여 그림으로 나타내면 다음의 그림 2와 같다. 여기서, 전압의 단위는 PU Volt이나 그림에서는 간단히 V로 표시하였다.

표 1. 각 상정사상에 대한 LSC

상정사상	LSC[MW]	상정사상	LSC[MW]
건전상태	2934.2	#18사고	2679.3
#1사고	2932.5	#19사고	2950.0
#2사고	2948.7	#20사고	2939.3
#3사고	2927.7	#21사고	2931.6
#4사고	2984.6	#22사고	2928.1
#5사고	2609.1	#23사고	2605.3
#6사고	2934.2	#24사고	2938.4
#7사고	2783.5	#25사고	2924.2
#8사고	2902.5	#26사고	2855.0
#9사고	2924.5	#27사고	2934.2
#10사고	2355.8	#28사고	2934.7
#11사고	2934.2	#29사고	2935.7
#12사고	2959.5	#30사고	2935.9
#13사고	2914.9	#31사고	2936.9
#14사고	2900.0	#32사고	2937.1
#15사고	2877.2	#33사고	2932.8
#16사고	2878.5	#34사고	2933.4
#17사고	2708.7		

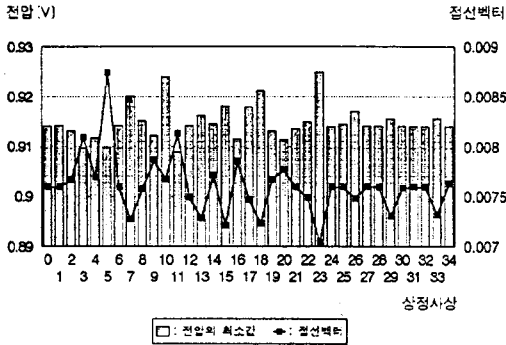


그림 2. 각 상정사상에 대한 모선전압의 최소치

본 연구의 IEEE RTS 계통에서는 모든 상정사상에 대해 모선 6의 전압값이 가장 낮은 전압값을 가지며 또한 이 때의 모선 6의 접선백터도 가장 큰 절대값을 가지고 있어 이 접선백터의 정보로부터도 모선 6의 전압이 가장 큰 문제가 됨을 알 수 있다. 여기서, 접선백터는 100 MW 기준의 단위값이며 원래 음의 값을 가지나 수치예에서는 (-) 부호를 생략하여 다루기로 한다.

그림 2으로부터 상정사상 #5의 경우(LSC : 2609.1MW)는 부하가 건전상태보다 325.1MW가 감소했음에도 불구하고 전압은 오히려 0.015PU가 감소하는 심각한 양상을 보이고 있고 또한 접선백터의 값도 가장 큰 값(0.00874)을 보이고 있어 전압안정도 측면에서도 가장 문제가 되는 상정사상임을 알 수 있다. 이와같이 그림 2에 나타난 전압 및 접선백터의 정보를 이용하여 전압을 고려한 최대전력수송량의 결과를 정리하면 다음의 그림 3과 같다.

그림 3은 각 상정사상에 대한 최대전력수송량 산정시 전압제약을 각각 0.92PU, 0.93PU, 0.94PU의 3단계로 설정할 때의 최대전력수송량의 감소특성을 보인 것으로서 본 시험계통에서는 전압의 하한치에 문제가 되므로 전압 상한치에 대해서는 언급하지

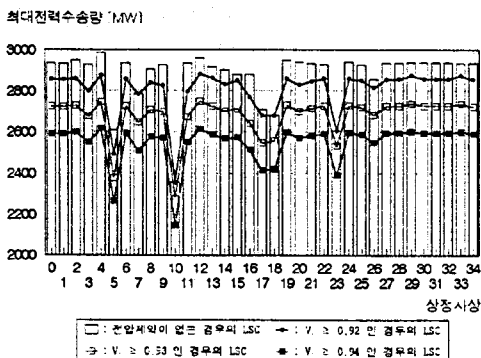


그림 3. 각 상정사상에서 전압제약을 고려한 최대전력수송량

않기로 한다. 여기서, 전압값의 실제적인 제약방법은 계통의 운용특성이나 안전도 면 등에서 면밀히 고려되어야 할 사항이므로 해석범위의 한정을 위해 전압제약을 상기와 같이 상정하는 것으로 하였다.

그림 3으로부터 전압제약이 없는 경우의 최대전력수송량은 직류조류식에 의해 모든 모선전압이 1PU라고 가정된 상황에서 구해진 값이므로 그림과 같이 전압을 고려했을 때의 최대전력수송량은 건전상태 및 대부분의 상정사상에서 무시할 수 없는 변화 폭을 갖는다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서 제안한 전압제약을 고려한 최대전력수송량 산정에 관한 연구의 주요결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 본 연구에서는 전력계통의 수송력을 실질적으로 평가하기 위해 계통의 건전상태 및 각 선로의 1회선 상정사고 하에서 부하모선의 전압제약이 고려된 최대전력수송량(LSC)을 구하는 방법론을 제시하였다.

(2) 이를 위해, Continuation 알고리즘으로부터 개발된 전력조류계산법을 이용하여 별도의 계산과정 없이 선형의 전압방정식을 근사하기 위한 접선백터(Tangent Vector)를 구하고 이를 최대전력수송량을 구하는 선형계획법의 최적화 문제에 적용할 수 있도록 하였다.

(3) 향후, 전압제약을 보다 효율적으로 풀 수 있는 선형계획법의 알고리즘 개발과 정적인 전압안정도 문제까지 고려한 최대전력수송량의 산정문제에 대해 계속 연구해 나갈 계획이다.

(참 고 문 헌)

- [1] 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
- [2] 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, February 1991
- [3] 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
- [4] V. Ajjarapu, C. Christy, "The Continuation Power Flow: A Tool for Steady State Voltage Stability Analysis", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.7, No. 1, February 1992.