

복합전력계통의 최대전력 수송능력 산정에 관한 연구

국경수^{*)} 남궁재용^{*} 이병준^{*} 송길영^{*} 차준민^{**}

* : 고려대학교 전기·전자·전파공학부 ** : 대전대학교 전기공학부

A Study on the calculation of LSC in composite power systems

K.S. Kook^{*)} J.Y. NamKung^{*} B.J. Lee^{*} K.Y. Song^{*} J.M. Cha^{**}

* : Korea University ** : Daejin University

Abstract - This paper presents an algorithm for the calculation of LSC(Load Supplying Capability) in composite power systems. LSC means the maximum load which the composite power system can supply under the constraints of interest and power flow equations. In this paper, Successive Linear Programming algorithm is used to calculate the LSC of composite power systems. This algorithm is applied to the Six-Bus system and IEEE RTS.

1. 서 론

최근, 신도시의 개발과 경제 성장 등으로 인해 수용가의 전력 수요가 급속히 증가하고 있다. 이와 같이 증가일로에 있는 전력 수요에 대응하여 발전소의 건설 등으로 공급력을 확보하는 것도 중요하지만, 발전된 대량의 전기를 안전하게 수송하기 위한 수송능력의 확보도 중요한 현안이다. 이에 따라 전원 및 송전계통으로 이루어진 복합계통에서 수송능력의 정량적인 평가 작업의 필요성이 대두되고 있다.[1]

복합계통의 신뢰도와 관련된 연구는, L. L. Garver와 P. R. Van Horne 등이 복합계통에서의 최대전력수송량(LSC)을 구하는 논문[2]을 처음으로 발표하였고 그 뒤, Philip R. Van Horne [3]등이 최대전력수송량을 이용하여, 복합계통의 신뢰도지수를 정량적으로 계산하는 방법을 제안하였다. 그 후에는 J. Toyoda[4] 등에 의하여 복합계통의 신뢰도 평가에 관한 새 지수들이 소개되었고, 최근에는 일본의 전력중앙연구소에서 전력계통의 수송력을 평가하는 논문[5]이 발표되었다. 그러나 이러한 종래의 방법들은 조류계산에서 단순히 직류조류계산법만을 이용하였기 때문에 정확한 조류계산의 결과와는 많은 차이가 있고, 예측된 최대부하만큼 전력을 공급하게 되는 경우의 부하모선 전압의 한계치 위반정도나 선로의 과부하정도 등을 구할 수 없는 단점이 있다.

본 논문에서는 이러한 단점들의 보완을 위해 조

류계산에서 교류조류계산을 사용하고, 전압제약도 고려하여 최대전력 수송능력을 계산한다. 이를 위해 교류조류 계산에서 구한 값을 이용하여 Linear Programming(LP)정식화[6]를 행하여 계산하고, 수렴조건을 만족할 때까지 지정치를 수정하여 다시 교류 조류계산을 하는 과정을 반복하는 Successive Linear Programming(SLP)기법을 사용한다. 즉, 이와 같은 반복과정을 통해 비선형의 특징을 갖는 전력조류 방정식을 선형화할 때 생기는 오차를 최소로 하면서 선로 손실, 전압제약 등이 고려되는 LSC를 계산한다.

본 논문에서는 우선 2절에서 전력수송능력을 정식화하고 3절에서 이를 선형화하여 계산하는 SLP 기법을 소개하며 4절에서 이 기법을 시험 계통에 적용시킨 결과를 보인다.

2. 최대전력 수송능력 산정을 위한 정식화

최대전력 수송능력이란 전원 및 송전선로의 상·하한 제약하에서 조류 계산을 만족시키면서 전원과 송전망으로 구성된 복합계통이 얼마나 많은 전력을 계통의 부하에 공급할 수 있는가를 나타내는 양이다. 이는 전원 및 계통의 제약들을 제약조건으로 하고, 계통의 총 부하량이나 총 공급량의 최대화를 목적함수로 하는 최적화문제로 정식화하여 이를 풀면 얻을 수 있다. 본 논문에서는 최대전력 수송능력의 산정을 아래와 같이 정식화하였다.

● 목적함수 : $\text{Max} \sum_{i=1}^{N_b} \omega_i P_{Gi}$

● 제약조건 :

- Ⓐ 부하모선 전압제약 : $V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}$
- Ⓑ 발전기출력제약 : $P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}$
- Ⓒ 회로방정식 :

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^N [G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}] V_j$$

$$Q_i = V_i \sum_j^N [G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}] V_j$$

④ 선로조류제약 : $F_{ij}^{\min} \leq F_{ij} \leq F_{ij}^{\max}$
단,

$$F_{ij} = -V_i^2 G_{ij} + V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij})$$

N : 총 모선수

N_g : 발전기 모선수

ω_i : i번째 발전기모선 출력의 가중치

이와 같은 최적화 문제를 풀기 위해 본 논문에서는 다음과 같은 SLP기법을 사용한다.

3. 최대전력 수송능력 계산 알고리즘

정확한 LSC값을 얻기 위해서는 계통의 제약조건에 비선형의 전력조류방정식이 포함되어야 하는데 이를 위해 SLP기법을 사용한다. 즉, 비선형방정식은 선형화 되어 계산에 포함되고 선형화에 의한 오차는 SLP반복을 통해 감소된다.

계산 과정은 크게 Base Case 조류계산, LP정식화, LP계산, 지정치의 수정, 수렴판정의 5단계로 구성된다. 그림 1은 LSC를 계산하는 전체적인 흐름도를 나타낸 것이다.

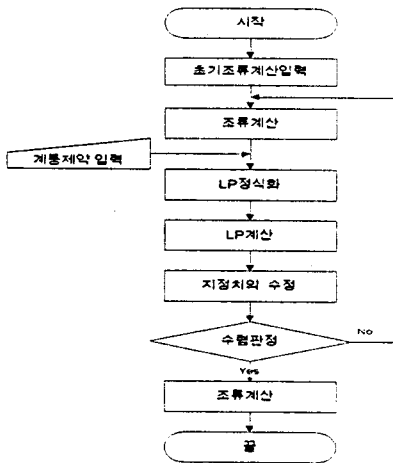


그림 1. SLP기법을 이용한 LSC계산의 흐름도

3.1 Base Case 조류계산

계통에 대한 입력을 받아서 교류조류계산을 수행한 후 그 해를 LP정식화 단계로 넘겨준다. 이 교류조류계산의 해는 반복에서 각각의 Base Case가 된다.

3.2 LP정식화

조류계산의 해를 Base Case로 하여 증분량들을 가지고 LP문제로 정식화한다. 이때, 비선형 방정식들은 Base Case 조류계산의 결과를 이용하여 선형화 한다.

3.3 LP계산

LP정식화를 통해 LP문제를 구성한 후 이를 Simplex Algorithm[6]을 이용하여 계산한다. 이때, 이 계산값들은 모두 Base Case에 대한 증분량이 된다.

3.4 지정치의 수정

LP계산 결과 얻어진 각 증분량들을 가지고 Base Case의 값들을 수정한다.

3.5 수렴판정

계산결과 Δ LSC값이 수렴한계내에 들어오면 최종적으로 교류조류계산을 수행한 후 계산을 종료하고, 그렇지 않으면 수정된 지정치를 가지고 새로운 Base Case 조류계산을 한 후 3.2절 이후의 과정을 반복한다.

본 연구에서 제시한 SLP기법에 의한 LSC계산을 먼저 간단한 6모선 모델계통에 적용하여 그 유용성을 검증하고, IEEE RTS 계통으로 확장하였다.

4. 사례연구

4.1 6모선계통에의 적용

사례연구를 실시한 6모선 모델계통은 3개의 발전기모선이 있고 발전설비용량이 1050[MW]이다. 자세한 계통의 자료는 참고문헌[7]을 참고하기 바란다.

초기 조류계산입력에서 각 모선에 공급되는 전력은 전원 총 용량의 70%를 기준으로 각 부하모선의 비율에 의해 배분하였고, 발전기 출력도 용량 상한치의 70%로 보았다. 부하모선의 전압제약은 첫 번째 조류계산결과와 ± 0.05 로 하였으며, 수렴판정은 Δ LSC < 0.1[MW]로 판정하였다.

건전상태에 대해서는 LSC값이 866.67[MW]로 계산되었고, 각 선로의 상정 사고에 대한 LSC값들도 계산하여 이를 그림 2에 보인다.

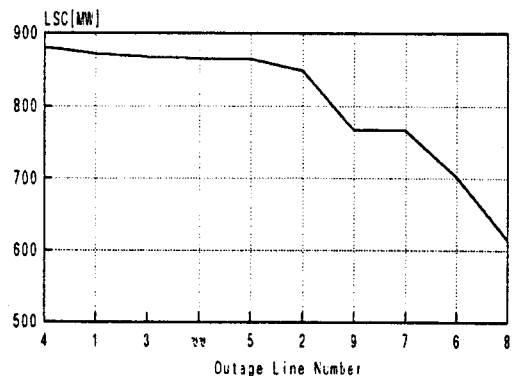


그림 2. 6모선 계통의 LSC계산 결과

제안한 방법에 의해 계산한 각 LSC값들을 직류 조류제약을 사용한 결과와 비교하여 다음 표 1.에 정리하였다.

표 1. 각 상정사고에 대한 계산결과

CASE	직류조류제약을 사용한 결과[2]		제안한 방법	
	병목선로	LSC[MW]	병목선로	LSC[MW]
건전상태	#6	873.56	#6	866.67
#1선로사고	#8	870.50	#8	872.85
#2선로사고	#6	863.64	#6	849.12
#3선로사고	#6	877.72	#6	867.64
#4선로사고	#6	876.05	#6	881.74
#5선로사고	#6	872.41	#6	865.06
#6선로사고	#6	735.32	#6	702.32
#7선로사고	#6, #7	799.26	#6, #7	766.71
#8선로사고	#8	650.51	#8	614.79
#9선로사고	#6	789.50	#6	766.83

대부분의 경우 제안한 방법으로 계산한 LSC값이 직류조류제약을 사용하여 계산한 값보다 작게 나왔다. 그러나, 병목선로는 두 방법 모두 일치하였고, 위상각과 전압, 임피던스에 의해 결정되는 선로조류도 유사한 결과를 보였다.

4.2. IEEE RTS에의 적용

제안한 방법을 IEEE RTS에 확장, 적용해 보았다. 이 계통은 10개의 발전기 모선과 14개의 부하 모선으로 구성되어 있으며 발전설비용량은 3405[MW]이다. 적용방법은 6모선계통의 경우와 같고, 계통의 자세한 자료는 참고문헌[7]을 참고하기 바란다. 건전상태와 상정사고들에 대한 LSC 계산 결과를 다음 그림 3.에 보인다. 건전상태에서 계통의 LSC값은 3316.93[MW]으로 계산되었다.

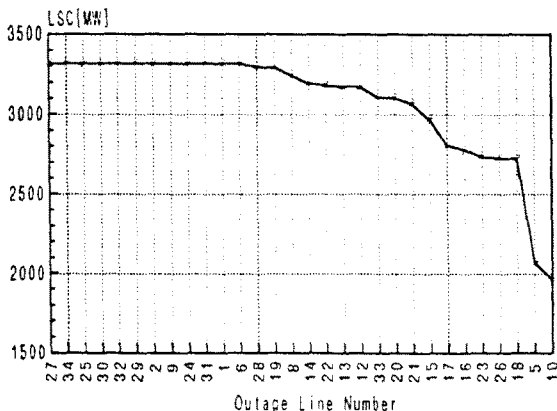


그림 3. IEEE RTS의 LSC계산 결과

5. 결론

본 논문에서는 복합계통에서의 수송능력의 정량적인 평가지수인 LSC를, 교류조류제약을 고려하여 보다 정확히 계산하기 위해 SLP기법을 제안하고 이를 6모선계통과 IEEE RTS에 적용하였다.

그 결과 선로손실이 고려되고, 부하모선의 전압, 위상각 등에 제약을 줄 수 있게 되어 보다 실제적인 LSC값을 계산할 수 있었다.

앞으로 이런 LSC값으로 현재의 계통을 보다 정확히 평가할 수 있고, LP에서 얻을 수 있는 감도계수 등을 통해 계통의 보강계획 등에 사용할 수 있을 것이다.

[참고문헌]

- [1] 송길영, "전력계통의 해석 및 운용", 동일출판사, 1993
- [2] L. L. Garver, P. R. Van Horne, K. A. Wirtg, "Load Supplying Capability of Generation Transmission Networks", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-98, No.3, pp.957-962, 1979.
- [3] Philip R. Van Horne, Carol N. Schoenberger, "TRAP : An Innovative Approach to the Reliability of Transmission Plans", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-101, No.1 January, pp.11-16, 1982
- [4] L. N. Chen, H. Suwa, J. Toyoda, "Power Arrival Evaluation of Bulk System including Network Constraints based on Linear Programming Approach", IEEE Trans. Power System, 6, 37 (1991)
- [5] "電力系統의 轉送力評價-計劃段階에서의 系統轉送力評價에 關한 考察", 日本 電力中央研究所 研究報告, T91062, 1992
- [6] B. E. Gillett, "Introduction to Operation Research", McGraw-Hill Book Company, 1976
- [7] 고려대학교 부설 에너지기술 공동 연구소, "SLP 기법을 이용한 최대전력수송능력 산정에 관한 사례 연구", 1997.5