

상정사고를 고려한 최적조류계산 연구

최 길\* , 원 종 루  
 안양대학교 전기전자공학과 전력계통연구실

Study on the Security-Constrained Optimal Power Flow

Kil Choi\* , Jong-Ryul Won  
 Department of Electrical & Electronic Eng. Anyang University

Abstract -

This paper proposes a MATLAB program for solving security-constrained optimal power flow using linear programming. Security-constrained optimal power flow can find an optimal generation satisfying bus voltage limits, line flow limits, reactive generation limits, even if contingency occurs. Sensitivity matrixes are obtained based on power flow solutions with and without single line contingency. This program is tested for an IEEE 14bus system with 5 generators. Results shows good ability of finding optimal solution in case of a single line contingency.

성 제약 최적조류계산을 선형계획법을 이용하여 풀기 위한 정식화를 제시하였다. 3장에서는 IEEE 14모선 계통에 대하여 사례연구를 수행한 결과를 제시하고 기존 OPF 결과와 비교하였다.

2. 안전성제약 최적조류계산의 정식화

최적조류계산이란 전압 및 선로용량제약을 만족하면서 최소의 비용으로 계통부하를 만족시키는 최적의 발전력을 계산하는 기법이다. 본 논문의 최적조류계산에서 입력변수를 발전력의 증분  $\Delta P_G$ (슬랙모션 제외)으로 정의할 때, 최적조류계산 문제를 정식화하면 다음과 같다. 우선 초기 조류계산결과를 바탕으로 다음과 같이 감도행렬을 구한다.

1. 서 론

전력계통의 운용은 최소의 비용으로 경제적인 (economical) 이익을 추구하면서도, 이와 상반되는 신뢰도(reliability)를 유지하여야 하는 두 가지 목적을 동시에 추구하고 있다. 경제적인 이익을 얻기 위해 최소의 비용으로 발전을 하기 위해서는 그만큼의 신뢰도가 무너지게 되며, 신뢰도를 높게 유지하기 위해서는 그만큼의 경제적 손실이 따르게 된다. 따라서 이 두 가지 목적을 동시에 적절히 만족시키기 위한 방법이 필요하게 된다. 최적조류계산(OPF : Optimal Power Flow)은 이러한 두 가지 목적을 달성하기 위한 적절하고 효과적인 대안이 될 수 있다. 특히 안전성제약 최적조류계산(SCOPF : Security-Constrained Optimal Power Flow)은 최적운전점에서 상정사고 발생시에도 안정도를 계속 유지하도록 미리 제약조건을 추가하여 계산하는 방법이다[1,8].

본 논문에서는 선형계획법(LP : Linear programming)을 이용[4-6]하여 정상시 및 상정사고시에도 선로과부하제약 및 전압제약을 만족하도록 하는 최적조류계산을 수행하기 위해 MATLAB을 이용한 프로그램을 개발하였다. MATLAB은 행렬계산이나 최적화계산 등에 대해 다양하면서도 효과적인 Tool을 제공하고 있으며 사용하기가 간편하여, 최근 들어 과학기술계산이나 공학분야에서 많이 사용되고 있다.

선형계획법은 다른 최적화기법에 비하여 그 수행속도가 빠르고 계산하기가 편리하여 많이 이용되고 있는 방법이다. 그러나 심한 비선형문제에서는 사용시 오차가 발생하므로 동작점을 계속 바꾸어가면서 반복하여 계산하는 방법을 사용할 수가 있다. 선로 상정사고시에도 제약을 만족하도록 하는 안전성제약 선형감도식을 계산하기 위하여 정상시 초기 조류계산 결과를 이용한 감도와, 초기 발전력에서 사고시 조류계산을 수행한 결과를 이용한 감도를 따로 계산하여 이를 모두 선형계획법의 제약조건에 추가하여 계산한다. 이를 IEEE 14모선 계통에 대하여 사례연구를 수행하여 결과를 분석하고 비교한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 안전

$$\Delta P_L = 0, \quad \Delta Q_L = 0 \tag{1}$$

$$A_1 \cdot \Delta P_G = \begin{bmatrix} \Delta \theta_L \\ \Delta V_L \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$A_2 \cdot \Delta P_G = \Delta Q_G \tag{3}$$

$$T \cdot \Delta P_G = \Delta F_{line} \tag{4}$$

$$S \cdot \Delta P_G = \Delta P_{stack} = \Delta P_1 \tag{5}$$

이를 바탕으로 다음과 같은 최적화문제를 수립할 수가 있다. 즉 발전비용을 최소화하면서 발전력의 제약, 모선 전압의 제약, 발전 무효전력 제약, 선로조류제약을 모두 만족해야 한다[1]. 발전비용은 일차선형화를 위해, 이차식이 아닌 단일 단가로서 가정하였다.

$$\begin{aligned} \min. & \sum_{k=1}^{N_G} C_k \cdot \Delta P_{G_k} = \\ \min. & \left( \sum_{k=2}^{N_G} C_k \cdot \Delta P_{G_k} \right) + C_1 \cdot \Delta P_1 = \\ \min. & \sum_{k=2}^{N_G} (C_k + C_1 S_k) \cdot \Delta P_{G_k} = \sum_{k=2}^{N_G} C'_k \Delta P_{G_k}, \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} \text{s. t.} \\ \Delta P_L = 0, \quad \Delta Q_L = 0 \end{aligned} \tag{7}$$

$$P_{G_{min}} - P_{G_0} \leq \Delta P_G \leq P_{G_{max}} - P_{G_0} \tag{8}$$

$$\begin{bmatrix} \theta_{min} - \theta_0 \\ V_{min} - V_0 \end{bmatrix} \leq A_1 \cdot \Delta P_G \leq \begin{bmatrix} \theta_{max} - \theta_0 \\ V_{max} - V_0 \end{bmatrix} \tag{9}$$

$$Q_{G_{min}} - Q_0 \leq A_2 \cdot \Delta P_G \leq Q_{G_{max}} - Q_0 \tag{10}$$

$$F_{min} - F_{line0} \leq T \cdot \Delta P_G \leq F_{max} - F_{line0} \tag{11}$$

여기서,  $A_1, A_2, T$  행렬은 초기발전력 상태에서의 조류계산결과를 기본으로 만들어진 민감도 행렬이다. 한편 안전성제약 최적조류계산에서는 이 외에 다음과 같은 제약조건을 추가하여야 한다. 이는 최적 발전력상태에서 상정사고 발생시에도 제약을 벗어나지 않도록 하는

안전도(security) 제약조건을 의미한다. 즉, 최적점에서 선로사고 발생시에도 전압제약조건, 선로조류 제약조건을 항상 만족시켜야 한다.

s. t.

$$\begin{bmatrix} \theta_{\min} - \theta_0^* \\ V_{\min} - V_0^* \end{bmatrix} \leq A_i^* \cdot \Delta P_G \leq \begin{bmatrix} \theta_{\max} - \theta_0^* \\ V_{\max} - V_0^* \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$F_{\min} - F_{\text{lim}0} \leq T^* \cdot \Delta P_G \leq F_{\max} - F_{\text{lim}0} \quad (13)$$

여기서,  $A_i^*$ ,  $T^*$  행렬은 처음의 초기발전력 상태에서 미리 선택된 선로의 상정사고를 모의한 조류계산결과를 기본으로 만들어진 민감도 행렬이다. 수행과정을 다이어그램으로 나타내면 다음과 같다. 선형 계획법 계산은 MATLAB[2]에서 주어지는 LINPROG 함수를 사용하였다. 상정사고 선택과정은 본 논문에서는 생략되어 있으며, 임의로 사고선로를 가정하였다.

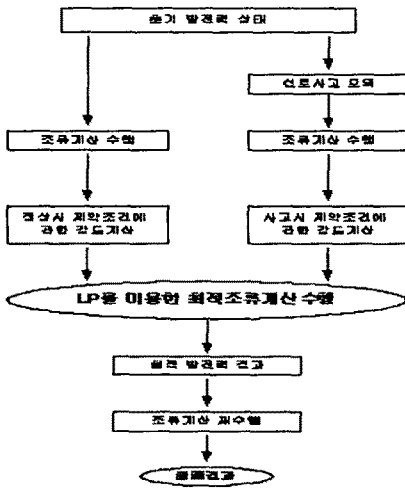


그림 1 안전성 제약 최적조류계산 수행과정

### 3. 사례 연구

본 논문에서는 위에서 정식화한 최적조류계산을 MATLAB을 이용하여 구현하였다. 대상 계통은 IEEE 14모선계통을 사용하였다[3]. 선로사고는 5-4모선간 선로사고를 모의하였다. 모선 및 선로에 관한 데이터는 아래의 표1과 2에 정리하였다. 전압한계는 정상시에는 0.95 ~ 1.05 [p.u.], 사고시에는 0.93~1.07 [p.u.]로 임의로 설정하였다. 슬래코선은 1번모선으로 설정하였다.

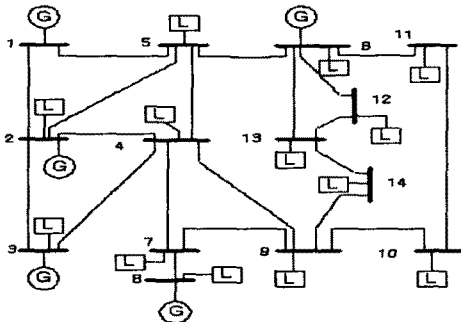


그림 2 IEEE 14모선계통도

OPF의 결과를 정확히 알아보기 위하여 표 4에서 나온 것처럼 처음부터 선로과부하가 존재하는 경우를 가정하였다. 전체적인 계통도는 그림 2에 자세히 나타나 있다.

표 1 모선데이터

모선번호	PG <sub>max</sub>	PG <sub>min</sub>	QG <sub>max</sub>	QG <sub>min</sub>	PL (MW)	QL (Mvar)	COST 계수
1	200.0	10.0	200.0	-200.0	0.0	0.0	0.6
2	50.0	20.0	200.0	-200.0	11.7	12.7	3.5
3	80.0	15.0	200.0	-200.0	64.2	14.0	12.4
4	0.0	0.0	0.0	0.0	47.8	-3.9	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	7.6	1.6	0.0
6	120.0	10.0	200.0	-200.0	21.2	7.5	1.6
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	45.0	10.0	200.0	-200.0	35.0	5.0	5.0
9	0.0	0.0	0.0	0.0	29.5	16.6	0.0
10	0.0	0.0	0.0	0.0	9.0	5.8	0.0
11	0.0	0.0	0.0	0.0	3.5	1.8	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	6.1	1.6	0.0
13	0.0	0.0	0.0	0.0	13.5	5.8	0.0
14	0.0	0.0	0.0	0.0	14.9	5.0	0.0

표 2 선로데이터

선로	R	X	선로한계
1-2	0.0192	0.0575	240.00
3-2	0.0452	0.1852	48.00
2-4	0.0570	0.1737	84.00
1-5	0.0132	0.0379	72.00
2-5	0.0472	0.1983	48.00
3-4	0.0581	0.1769	36.00
5-4	0.0119	0.0414	96.00
5-6	0.0460	0.1160	60.00
4-7	0.0267	0.0820	48.00
8-7	0.0120	0.0420	72.00
4-9	0.0	0.2080	24.00
7-9	0.0	0.5560	60.00
9-10	0.0	0.2080	24.00
6-11	0.0	0.1100	30.00
6-12	0.0	0.2560	24.00
6-13	0.0	0.1400	36.00
9-14	0.1231	0.2559	36.00
10-11	0.0662	0.1304	24.00
12-13	0.0945	0.1987	24.00
13-14	0.2210	0.1997	24.00

표 3 발전력의 변화

모선번호	초기상태 PG	OPF 결과	SCOPF 결과	COST 계수	PG <sub>max</sub>	PG <sub>min</sub>
1	92.22	99.90	97.25	0.6	200.0	10.0
2	50.00	20.00	50.00	3.5	50.0	20.0
3	70.00	15.00	19.34	12.4	80.0	15.0
6	30.00	94.41	60.10	1.6	120.0	10.0
8	25.00	37.99	40.31	5.0	45.0	10.0

안전성제약을 고려하지 않은 경우의 최적조류계산 결과와 고려한 경우에 대하여 같은 초기상태에서 결과를 비교하였다. 표 4와 5의 결과에서 알 수 있는 것처럼 안전성제약을 고려하지 않은 경우는 COST는 더 낮아졌으나 선로사고시 선로한계를 벗어남을 알 수가 있다. 굵게 표시된 것이 과부하를 표시하고 있다. 그러나 안전성제약을 고려한 최적조류계산에서는 COST는 제약이 없는 경

우보다는 약간 더 높아지지만 상정사고시에도 선로계약을 벗어나지 않음을 알 수가 있다. 약간의 차이는 LP수행결과 후에 다시 조류계산을 수행함으로써 슬랙모션의 발전력에서 약간의 차이가 있어 발생하는 문제이다. 이는 손실분을 일차선형화에서 생기는 문제[6,7]로서 선형계획을 반복하거나 이차합수계획법등을 이용하여 감소시킬 수가 있다.

표 4 선로조류의 변화

선로	선로한계	초기조류	OPF 결과(1)	(1)에서 5-4선로 사고시	SCOPF 결과(2)	(2)에서 5-4선로 사고시
1-2	240.00	10.79	39.90	74.46	24.45	55.72
3-2	48.00	-9.94	-32.18	-48.36	-33.15	-47.88
2-4	84.00	26.15	15.39	48.87	21.90	52.37
1-5	72.00	<b>81.45</b>	60.00	28.27	72.08	44.10
2-5	48.00	12.92	-0.21	-16.79	7.03	-8.01
3-4	36.00	15.74	-17.02	-0.84	-11.71	3.02
5-4	96.00	49.90	65.22	---	59.19	---
5-6	60.00	35.89	-13.51	3.62	12.31	28.19
4-7	48.00	17.01	1.55	-2.53	1.47	-2.28
8-7	72.00	-10.00	2.99	2.99	5.31	5.31
4-9	24.00	<b>26.15</b>	13.34	1.33	19.28	8.24
7-9	60.00	6.85	4.51	0.40	6.75	2.95
9-10	24.00	-1.57	-11.00	-20.97	-5.91	-15.04
6-11	30.00	14.19	23.83	<b>34.18</b>	18.62	28.00
6-12	24.00	9.25	10.55	12.06	9.83	11.19
6-13	36.00	20.50	25.24	30.59	22.65	27.47
9-14	36.00	5.07	-0.65	-6.80	2.45	-3.26
10-11	24.00	-10.57	-20.00	<b>-29.97</b>	-14.91	-24.04
12-13	24.00	3.15	4.45	5.96	3.73	5.09
13-14	24.00	10.14	16.17	23.02	12.86	19.03

표 3에서 보는 것처럼 발전력은 당연히 비용이싼 1번과 6번 발전기가 많이 운전되는 것을 알 수가 있다. 그러나 그 크기는 제약조건으로 인해 제약된다. 1번 발전기를 예를 들면 1-5 선로의 용량계약으로 인하여 최대가능발전량 200[MW]까지는 발전이 되지 못하는 것을 알 수가 있다.

표 5 COST의 변화

	초기상태	OPF 결과	SCOPF 결과
COST	12.71	6.57	7.71

표 6 모션 전압의 변화

모션번호	초기전압	OPF 결과(1)	(1)에서 5-4선로 사고시	SCOPF 결과(2)	(2)에서 5-4선로 사고시
1	1.0000	1.0000	1.0000	1.000	1.0000
2	1.0000	0.9994	1.0000	0.9999	1.0000
3	1.0000	0.9996	1.0000	0.9999	1.0000
4	0.9890	0.9894	0.9831	0.9895	0.9827
5	0.9947	0.9944	0.9984	0.9947	0.9988
6	1.0000	1.0006	1.0000	1.0001	1.0000
7	0.9940	0.9939	0.9922	0.9942	0.9920
8	1.0000	0.9994	1.0000	0.9999	1.0000
9	0.9650	0.9605	0.9504	0.9632	0.9543
10	0.9702	0.9644	0.9543	0.9677	0.9591
11	0.9885	0.9889	0.9867	0.9886	0.9873
12	0.9924	0.9950	0.9960	0.9935	0.9949
13	0.9870	0.9900	0.9910	0.9883	0.9898
14	0.9558	0.9509	<b>0.9416</b>	0.9537	<b>0.9458</b>

표 6에서 보는 것처럼 모션전압은 모두 제약조건을 만족하는 해가 도출되었다. 물론 사고시에는 0.95[p.u.]미만이나, 이는 문제에서 정한 0.93[p.u.]까지는 모두 만족시키는 것이다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 선형계획법을 이용하여 정상시 및 상정사고시에도 선로과부하계약 및 전압제약을 만족하도록 하는 최적조류계산을 수행하기 위한 MATLAB 프로그램을 개발하였다. 선형감도식을 계산하기 위해 정상시 초기 조류계산 결과를 이용한 감도와, 초기 발전력에서 사고시 감도를 따로 계산하여 이를 모두 선형계획법의 제약조건에 추가하여 계산하여 보았다. 대상 계통은 IEEE 14 모션계통을 이용하였으며 정상시 및 단일선로사고시에도 선로계약 및 전압제약을 모두 만족하는 결과를 얻었다. 이를 기존 OPF계산결과와 비교하여 보았다. 이러한 방법은 전력시장에서 발전단가가 주어질 때 급전계획에 대한 사전평가나, 남북간 융통전력 분석시에 효과적인 교육적 수단으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] A. J. Wood, B. F. Wollenberg, *Power Generation Operation and Control*, John Wiley & Sons Inc., 1996.
- [2] Hadi Saadat, *Power System Analysis*, McGraw Hill, 1999.
- [3] 김규호 외 3인, "최적전력조류해석을 위한 윈도우 프로그램 패키지 개발", 대한전기학회 논문지, 50A권, 12호, pp.584- 590, 2001.
- [4] B. Stott, J. L. Marinho, "Linear Programming For Power-system Network Security Applications", IEEE Trans. on Power Apparatus and System, Vol.PAS-98, No.3, pp.1093-1097, May/June 1979.
- [5] O. Alsac, J. Bright, M. Prais, B. Stott, "Further Developments in LP-Based Optimal Power Flow", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.5, No.3, pp.697-711, Aug. 1990.
- [6] M. Olofsson, G. Andersson, L. Soder, "Linear Programming based Optimal Power Flow Using Second Order Sensitivities", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.10, No.3, pp.1691-1697, Aug. 1995.
- [7] Z. Yan, N. D. Xiang, etc., "A Hybrid Decoupled Approach To Optimal Power Flow", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.11, No.2, pp.947-954, May 1996.
- [8] H. Harsan, N. Hadjsaid, P. Pruvot, "Cyclic Security Analysis for Security Constrained Optimal Power Flow", IEEE Transaction on Power Systems, Vol.12, No.2, pp.948-953, May 1997.