송전선로 과부하를 해소하기 위한 민감도에 근거한 알고리즘 연구

(A study on an algorithm based on sensitivity method for alleviating overloads in power networks)

이병하 백정명
인천대학교 전기공학과

Byung-Ha Lee Jung-Myoung Baek*
Department of Electrical Engineering, University of Incheon

Abstract

In this paper, a new algorithm based on sensitivity method for alleviating overloads in power networks is presented to find the switching branches effectively. Preferentially the switching of shunt reactive devices such as shunt reactor and shunt capacitors is performed. If overloads are not eliminated, the ranking of switching branches is calculated according to the algorithm based on sensitivity method and the switching of the ranked branches is performed in the order of ranking until overloads are eliminated. In order to show the effects of this algorithm, it is applied to a small scale power system of IEEE 39-bus test system.

Key Words : overload, sensitivity method, switching, algorithm, power system

1. 서 론

현재 우리나라는 부하 성장이 꾸준한 성장을 계속하고 있어 전력을 원활히 공급하기 위하여 전원을 지속적으로 건설하여야 하고, 또한 이를 전기 소비자에게 전달하여야하므로 송전선로 등의 확충이 병행되어야 한다. 그러나 발전소 건설 입지 선정의 문제로 해서 우리나라의 전력계통은 지역적인 특성상 서해안지역, 호남지역, 영남지역 등의 원거리 발전기군과 대규모 부하밀집지역인 경인지역으로 분류할 수 있으며 이들 지역간 원활한 전력수급을 위하여 융통전력인 북상조류가 형성되는 특징이 있다. 전력 수요지 인근에 발전설비가 갖추어지는 이상적인 형태의 전력시스템과는 거리가 멀기 때문에 장거리의 대규모 전력 전송과 관련된 여러 가지 안정도 문제와 과부하의 문제가 발생하게 될 소지가 더 많아지게 된다. 상당한 규모의 전력이 수송되는 345kV 이상 송전선로는 이미 중부하로 운전되고 있는 실정이고, 사고 시에 선로 과부하가 발생하는 경우가 자주 일어 날 수 있다.

전력시스템의 정상상태의 운전 중에 설비 사고나 예기치 못한 부하 수요의 변화로 해서 송전선로 과부하가 발생하는 계통 운용 비상상태가 될 수 있다. 그러한 경우에 그 시스템의 부분적인 붕괴나 전체 붕괴를 피하기 위하여 일련의 제어동작들이 매우 짧은 시간에 취해져야 한다. 회로 스위칭은 전압과 회로 부하의 비상 상황을 경감시킬 수 있는 비용이 거의 들지 않는 방법이지만, 그것의 사용은 제한되어 있다. 회로 스위칭은 명확한 해결책으로 판단되는 경우나 다른 해결책이 없는 비정상적인 상황에서 수행된다. 현재는, 과부하 해소를 위한 회로 스위칭이 대개 엎라인으로 수행되고 운용자의 경험에 의하여 결정된다.

전반적인 과부하 해소 대책으로 송전선로의 재 스케쥴을 수행하게 되는데, 송전선로의 재 스케쥴은 송전선로와 변압기를 투입하거나 차단하는 것, 모선을 분리하거나 연계하는 것, 부하와 송전설비들을 다른 모선으로 절체하는 것, 병렬 설비들을 투입하거나 차단하는 것 등을 포함한다. 가능한 많은 회로 스위칭 선로들을 고려하면 더 나은 회로 구조를 찾을 가능성이 높아지기 때문에 도움이 되지만, 스위칭 할 수 있는 변수들의 조합의 성질 때문에 경우의 수가 너무나 커지게 되는 바람직하지 않은 문제가 발생한다.

경험 있는 운용자가 전력설비의 운용에서 중요한 역할을 수행하고, 짧은 시간에 매우 어려운 일들을 수행할 수 있으나, 운용자가 모든 가능한 형태에 익숙할 수는 없다. 선로 스위칭은 전력시스템 운용에서 자주 수행되는 일반적인 조작이 아니

기 때문에 단지 시스템의 도면과 실제 운전점을 관찰함으로써 신뢰할 만한 스위칭 전략을 제시하기에는 충분한 경험을 가지고 있지 않은 경우도 많다. 따라서, 어떠한 경우에는 적합하지 않은 조치를 취할 수도 있다.

이러한 문제점들을 해결하기 위하여 해외 선진국을 중심으로 송전선로 과부하 발생시에 이를 해소하는 기법들에 대한 연구들이 지난 80년대부터 수행되어 왔다[1]-[4]. 전력 시스템의 실 계통의 경우는 대규모 시스템이고 그 회로의 구성이 복잡하기 때문에 송전선로를 스위칭하기 위한 경우의 수가 너무나 많고 선로 스위칭마다 시스템의 구조가 달라지기 때문에 그 영향을 파악하기가 쉽지 않아 실계통 적용 단계의 연구는 많지 않았다.

본 논문에서는 최선의 해를 쉽게 찾을 수 있도록 하기 위하여 민감도에 근거한 과부하 해소 기법의 알고리즘을 제시하고, 소규모 시스템에 적용하여 그 시뮬레이션 결과를 보여준다. 과부하 해소 기법들이 프로그램으로 자동화 된다면 전력설비의 운용자에게 큰 도움을 줄 수 있고, 최선의 과부하 해소대책을 적용할 수 있으므로 설비를 보호하고 선로 과부하로 인한 정전 사고 확대를 방지할 수 있으므로 안정적 전력 공급에 기여할 수 있다.

2. 선로 조류 방정식과 민감도에 근거한 과부하 해소 알고리즘

2.1 전력시스템에서의 선로 조류

전력시스템은 발전기, 송전선, 변압기, 부하, 제어설비 등이 복잡하게 조합되어 전력을 생산, 수송, 배분하는 시스템이다. 발전기에서는 유효·무효 전력을 생산하고, 송전 시스템의 수송로를 거쳐 부하에서 전력을 소비하게 된다. 전력 조류계산은 발전기에서 발전된 유효전력과 무효전력이 어떻게 흘러서 부하에 공급이 되고, 각 변전소의 전압이나 각 송전선로의 전력 흐름이 어느 정도의 값인지를 계산하는 것이며, 전력의 흐름을 나타내는 요소로서 전압과 전력을 주로 사용한다. 일반적으로 발전기, 송전선, 변압기 등의 전력시스템을 구성하는 설비의 전기적 특성, 운용상태, 접속상태가 주어지면 계통의 전압의 크기나 전력의 흐름은 비선형 연립방정식의 형태로 표현되며, 이 방정식이 전력방정식이다. 전력조류계산은 전력시스템의 전력방정식을 정식화하고, 이 수식들을 풀어서 전력 시스템의 전압이나 선로의 조류를 구하는 계산으로서 전력시스템 해석의 기본이 된다.

전력시스템의 모선 i의 전압을 페이저로 표현하여 $\overline{V_i}$라 두고 모선 i에서 모선 j로 흐르는 전류를 $\overline{I_{ij}}$이라고 두면,

모선 i에서 모선 j로 흐르는 유효전력(P_{ij})과 무효전력(Q_{ij})은

$$\overline{V_i}\,\overline{I_i} = P_{ij} + jQ_{ij}^{*} \tag{1}$$

으로 표현된다. 여기서 *는 공액복소수를 의미하고, 윗 줄(−)은 페이저를 나타낸다. 모선 i와 모선 j 사이의 선로 어드미턴스를 페이저로 표시하여 $\overline{y_{ij}}$ 라고 두면 이것은 다시 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{ij} + jQ_{ij} &= \overline{V_i}\,\overline{I_{ij}^{*}} \\ &= \overline{V_i}[y_{ij}^{*}(\overline{V_i}^{*} - \overline{V_j}^{*})] \end{aligned} \tag{2}$$

여기서, 극좌표(polar form)로 변환하여

$$\overline{y_{ij}} = y_{ij}e^{j\theta_{ij}},\quad \overline{V_i} = V_i e^{j\delta_i},\quad \overline{V_j} = V_j e^{j\delta_j} \tag{3}$$

라고 두면, 식 (2)는

$$\begin{aligned} P_{ij} + jQ_{ij} &= \overline{V_i}\,\overline{I_{ij}} \\ &= V_i e^{j\delta_i}[y_{ij}e^{-j\theta_{ij}}(V_i e^{-j\delta_i} - V_j e^{-j\delta_j})] \\ &= y_{ij}(V_i^2 e^{-j\theta_{ij}} - V_i V_j e^{j(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})}) \end{aligned} \tag{4}$$

으로 표현된다. 이 식이 모선 i와 모선 j 사이의 선로에 흐르는 조류 방정식(Line flow equation)이다.

이 식 (4)를 모선 i에서 모선 j로 흐르는 유효전력(P_{ij})과 무효전력(Q_{ij})으로 분리해서 나타내 보면,

$$P_{ij} = y_{ij}[V_i^2\cos(\theta_{ij}) - V_i V_j\cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})] \tag{5}$$

$$Q_{ij} = -y_{ij}[V_i^2\sin(\theta_{ij}) + V_i V_j\sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})] \tag{6}$$

을 얻을 수 있고 위의 식 (5)가 유효 선로 조류 방정식, 아래 식 (6)이 무효 선로 조류 방정식이다. 이러한 한 쌍의 선로 조류 방정식은 각 선로마다 존재하므로 L개의 선로가 존재하는 전력 시스템이라면 모두 2L개의 선로 조류 방정식이 존재하게 된다.

2.2 민감도에 근거한 과부하 해소 알고리즘

선로의 조류를 나타내는 위의 식 (5)와 (6)으로부터 선로의 조류의 크기 LF^0를 구하여 과부하 선로가 있는지를 체크한다. 과부하 선로가 존재한다면 아래의 절차를 거쳐 선로 과부하를 해소할 수 있다.

전형적인 전력조류 계산식으로부터 무효전력에 관한 식에 대하여 표현하면 아래의 식으로 표현된다.

$$\Delta Q = S_1 \Delta\delta + S_2 \Delta V \qquad (7)$$

선로의 조류를 나타내는 위의 식 (5)와 (6)으로부터 과부하 선로들에 대한 선로조류 증가의 감도를 구하고 이에 해당하는 $\Delta\delta$와 ΔV의 값을 대입하여 ΔQ를 구한다. 이 값으로부터 과부하 선로의 조류를 줄이기 위하여 어느 모선의 무효전력 설비를 투입하여야 하는지가 결정된다.

송전선로의 스위칭은 전력시스템의 토포로지를 변경시키게 되어 위험부담이 있으므로 확실하거나 불가피한 경우가 아니면 억제하게 된다. 따라서 병렬 스위칭을 사용하여 무효전력 보상설비들을 투입하는 것을 최우선으로 고려하여, ΔQ의 정보에 맞추어 무효전력 보상설비를 투입한다. 이렇게 하여도 선로 과부하가 해소되지 않으면, 과부하 선로들의 선로 임피던스에 대한 선로 조류 민감도를 계산한다.

각선로의 임피던스를 일정 비율로 변화시키고 새로운 전력조류의 크기 LF^c를 계산한다. 과부하 선로들의 조류 변화 $\Delta LF^c = LF^c - LF^0$를 계산하고 절대치를 계산하여 랭킹을 매긴다. 각 선로의 임피던스를 일정 비율로 변화시킬 때 일률적으로 증가시킬 수도 있고 감소시킬 수도 있다. 임피던스를 일정 비율로 증가시키는 경우를 고려하면, ΔLF^c의 절대치의 순서대로 스위칭을 수행하되, ΔLF^c의 부호가 음이면 이 해당선로는 과부하 선로 조류를 줄이는 방향으로 작용하므로 이 선로는 차단시키고 조류계산을 수행하고 과부하 해소 효과를 계산한다. 반대로 양의 부호의 선로는 동일 조류의 통로에 투입시킬 추가 선로가 있는지를 체크하여, 그러한 선로가 있으면 그 선로에 투입시고, 동일하게 조류계산을 수행하고 과부하 해소 효과를 계산한다. 투입 시킬 선로가 없으면 다음 순위의 스위칭 대상선로로 넘어가고 대상 리스트에서 제외시킨다.

이 과정을 거쳐 선로조류 경감 순위를 결정하고, 이 순위대로 선로들의 스위칭을 수행하고, 매번 선로조류를 계산하여 만족한 수준에 이를 때까지 스위칭 조작을 중첩하여 수행한다. 만족한 수준에 도달하면 선로 과부하 해소 대책을 수립하게 되며, 모든 대상 선로들에 대하여 만족한 수준에 이르지 못하면, 발전력 배분이나 부하조정 등에 의한 선로 스위칭 이외의 해소대책을 별도로 세워야 한다.

이러한 과부하 해소대책 수립 알고리즘을 플로우차트로 나타내면, 아래 그림 1과 같다.

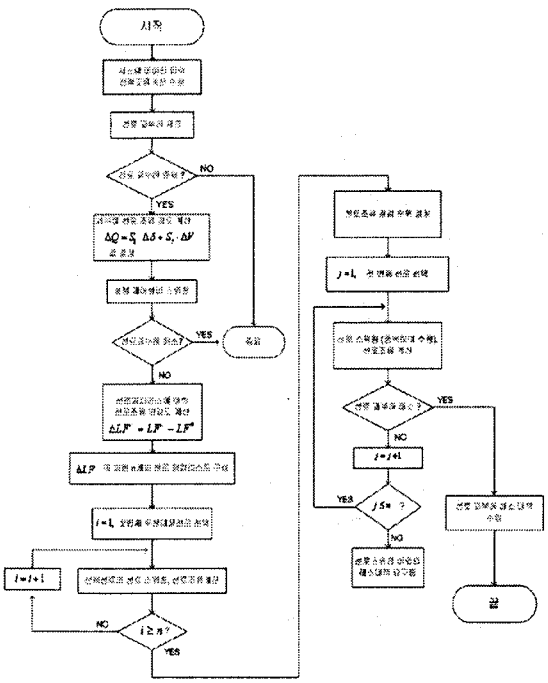

그림1. 과부하 해소대책 수립 알고리즘 플로우차트

3. 사례 연구

본 논문에서 제시하는 과부하 해소대책 수립 알고리즘을 전력시스템에 적용하기 위해 IEEE 39 모선 테스트 시스템을 사용하였다(그림1). 10기의 발전기와 39개의 모선과 46개의 선로가 있다.

이 시스템의 선로조류를 계산하여 선로조류가 많은 10개 선로를 나타내 보면 표 1과 같다. 여기서는 선로 스위칭을 수행하여 선로 과부하를 해소하는 목적이므로 발전기 모선에 방사상 모양의 선로들을 발전기의 출력을 조정하거나 부하를 조정하지 않으면 감소시킬 방법

이 없으므로 여기서는 고려하지 않고, 선로 스위칭 위주로 분석하기 위하여 무효전력 보상설비는 설치되어 있지 않은 것으로 가정하고, 고려 대상인 과부하 선로를 제외하고는 각 선로들에 필요시 여분의 선로가 존재하는 것으로 가정한다. 그리고, 피상전력으로 순위를 정하고 선로조류를 계산하는 것이 정확하나 본 알고리즘의 적용은 피상전력의 크기나 유효전력에도 똑 같은 방법으로 적용되므로 여기서는 계산과 이해의 편의를 위하여 유효전력에 대하여 본 알고리즘을 적용한다. 방사상으로 연결되어 선로 스위칭에 의하여 조정할 수 없는 선로들을 제외하고, 상위 10개의 유효전력의 선로조류가 표 1에 제시된다.

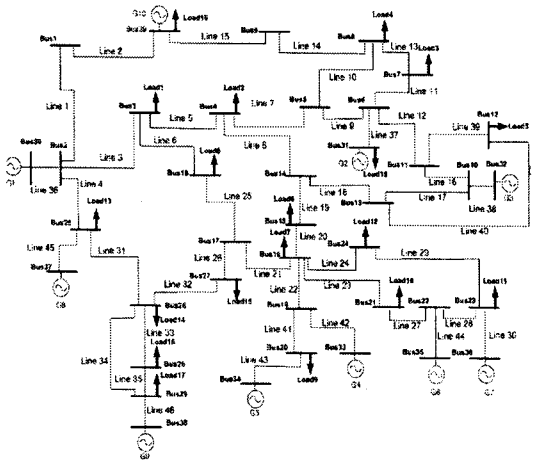

그림2. IEEE 39 모선 테스트 시스템

표1. 선로 유효전력

No	선로 번호	From bus	To bus	유효전력(MW)
1	9	15	16	-444.1
2	3	12	13	416.5
3	27	31	32	-411.1
4	11	16	17	372.6
5	35	38	39	-3.47.4
6	17	20	23	331.2
7	18	23	24	327.5
8	16	20	21	318.8
9	12	16	21	-313.2
10	32	36	37	312.2

위의 표에서 400[MW]이상인 선로가 3개 선로가 존재한다는 것을 알 수 있는데, 음의 부호는 To bus에서 From bus로 전류가 역방향으로 흐른다는 것을 나타낸다. 먼저 제일 조류가 많은 9번 선로에 대하여서만 제시한 알고리즘에 의하여 스위칭을 수행하여 보면 11번 선로의 여유 송전선로를 투입하고 10번 선로를 차단하는 것으로 순위가 매겨졌다.

이러한 선로 스위칭을 수행하였을 때의 결과가 표 2에 제시되어 있다. 2번의 선로 스위칭으로 스위칭 하기 전의 -444.1[MW]의 선로 조류에서부터 크게 감소하였음을 보여준다.

표2. 선로 스위칭 후의 1개 과부하 선로의 유효전력

스위칭 회수	스위칭 선로	스위칭 동작	스위칭 후의 9번 선로의 유효전력(MW)
1	11	선로 추가 투입	-348.4
2	10	선로 차단	-197.5

이번에는 상위 3개 선로를 각 선로의 정격보다 높은 과부하 선로라고 가정하고 410 [MW]이상의 선로조류에서 모두 380[MW]이하의 선로조류로 감소시켜 선로 스위칭을 통하여 선로조류 과부하를 해소하는 대책을 수립해 본다. 이 3 과부하 선로에 대하여 제시한 알고리즘을 적용하여 순위를 매겨 보면, 11번 선로, 29번 선로, 32번 선로, 31번 선로의 여유 선로를 투입하는 것으로 계산되었다. 이러한 선로 스위칭을 수행하였을 때의 결과가 표 3에 제시되어 있다. 스위칭을 수행하는 단계마다의 선로 조류의 변화를 알 수 있으며, 4번의 선로 스위칭을 수행한 후에는 과부하 선로인 9번, 3번, 27번 선로의 선로 조류가 원하는 수준인 380[MW]이하 인 것을 보여준다. 이의 값을 더 감소 시키기 위하여서는 스위칭을 더 많이 수행하여야 하며, 가장 이상적인 경우는 모든 선로의 조류가 평균적인 값을 가질 때이지만 이것은 현실적으로 불가능하여 어느 정도 이하로는 감소시킬 수 없는 상황에 도달하게 된다. 따라서, 과부하 조건을 피하는 운전 조건이면 된다고 본다.

표3. 선로 스위칭 후의 과부하 선로들의 유효전력

스위칭 회수	스위칭 선로	스위칭 동작	스위칭 후의 선로 유효전력(MW)		
			9번 선로	3번 선로	27번 선로
1	11	선로 추가 투입	-371.8	420.7	-411.1
2	29	선로 추가 투입	-371.8	420.4	-340.3
3	32	선로 추가 투입	-372.2	399.4	-340.3
4	31	선로 추가 투입	-373.8	372.8	-340.3

4. 결 론

전력시스템의 정상상태의 운전 중에 설비 사고나 예기치 못한 부하 수요의 변화로 해서 송전선로 과부하가 발생하는 계통 운용 비상상태가 될 수 있다. 그러한 경우에 그 시스템의 부분적인 붕괴나 전체 붕괴를 피하기 위하여 일련의 제어동작들이 매우 짧은 시간에 취해져야 하는데, 선로 스

위칭은 전력시스템 운용에서 자주 수행되는 일반적인 조작이 아니기 때문에 실제 운전상황을 판단하여 신뢰할 만한 스위칭 전략을 제시하기에는 운용자가 충분한 경험을 가지고 있지 않은 경우도 많으며 또한 경험 있는 운용자라 하더라도 모든 가능한 형태에 익숙할 수는 없다.

본 논문에서는 이러한 문제점들을 해결하고 최선의 해를 쉽게 찾을 수 있도록 하기 위하여 민감도에 근거한 과부하 해소 기법의 알고리즘을 제시하였으며, 이 알고리즘을 소규모 시스템에 적용하고 그 시뮬레이션 결과로서 그 효과를 보여준다. 제시된 알고리즘에 근거한 과부하 해소 기법이 프로그램으로 자동화 된다면 전력설비의 운용자에게 큰 도움을 줄 수 있고, 최선의 과부하 해소대책을 적용할 수 있으며 설비를 보호하고 선로 과부하로 인한 정전 사고 확대를 방지할 수 있으므로 안정적 전력 공급에 기여할 수 있다.

[참 고 문 헌]

[1] P.R. Bijwe, J. Nanda, K.L. Puttabuddhi, "Ranking of line outages in an AC-DC system causing overload and voltage problems ", IEE Proceedings-C, Vol. 138, No. 3, 1991, pp. 207-212.

[2] J. N. Wrubel, P. S. Rapcienski, K.L. Lee, B.S. Gisin, and G. W. Woodzell, "Practical experience with corrective switching algorithm for on-line applications", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 11, No. 1, 1996, pp. 415-421.

[3] G. Schnyder, and H. Glavitsch, "Security enhancement using an optimal switching power flow", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 5, No. 2, 1990, pp. 674-681.

[4] N. Muller and V.H. Quintana, "Line and shunt switching to alleviate overloads and voltage violations in power networks", IEE Proceedings, Vol. 136, Pt.C, No. 4, July 1989, pp.246-253.