

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

(Byung-Ha Lee · Jung-Myoung Baek)

요 약

본 논문에서는 전력시스템에서의 송전선로 과부하를 해소하기 위한 민감도에 근거한 새로운 선로 스위칭 알고리즘이 제시된다. 각 선로의 임피던스 변화에 대한 과부하 선로 조류의 민감도를 통하여 과부하 선로를 해소하기 위한 여유 송전선로의 투입과 운전 중인 선로의 차단을 한꺼번에 체계적으로 수행하는 새로운 스위칭 알고리즘을 제시하고, 수많은 케이스의 스위칭 경우의 수를 대폭적으로 줄임으로써 효율적으로 선로 스위칭을 수행하여 효과적인 과부하 해소 대책을 세우는 방안을 제시한다. 제시된 민감도에 근거한 알고리즘에 따라 스위칭선로들의 순위를 결정하고 이 순위에 따라 선로 과부하가 해소될 때까지 선로 스위칭을 수행한다. 이 기법을 IEEE 39 모선 시스템에 적용하여 제시된 알고리즘의 효과를 보여준다.

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. By applying the new sensitivity of the line flow with respect to the change of the branch impedance, both on and off switchings for alleviating overloads in power networks are performed systematically at once and an effective scheme for drawing up a plan to alleviate overloads of the lines is presented through screening a large number of line switching cases easily. The ranking of switching branches is calculated according to the new switching 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 : Alleviating Overloads, Sensitivity Method, Switching Algorithm, Change Of The Branch Impedance

* 주저자 : 인천대학교 전기공학과 교수
Tel : 032-770-8437, Fax : 032-765-8118
E-mail : bhlee@incheon.ac.kr
접수일자 : 2008년 5월 26일
1차심사 : 2008년 5월 30일
심사완료 : 2008년 7월 15일

1. 서 론

현재 우리나라의 전력계통은 지역적인 특성상 서해안지역, 호남지역, 영남지역 등의 원거리 발전기군과 대규모 부하밀집지역인 경인지역으로 분류할 수 있으며, 전력 수요지 인근에 발전설비가 갖추어지는 이상적인 형태의 전력시스템과는 거리가 멀기 때문에 장거리의 대규모 전력 전송과 관련된 여러 가지 안전도 문제와 선로 과부하의 문제가 발생하게 될 소지가 더 많아지게 된다. 상당한 규모의 전력이 수송되는 345[kV] 이상 송전선로는 이미 중부하로 운전되고 있는 실정이고, 사고 시에 선로 과부하가 발생하는 경우가 자주 일어날 수 있다.

전력시스템의 정상운전 상태 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. 대규모 시스템의 경우 전력 시스템이 망의 형태로 복잡하게 얽혀 있고 수많은 선로의 스위칭의 조합이 있어서 적절한 과부하 해소 대책으로서의 스위칭 방안을 찾기가 어렵고 어떤 개개 선로의 스위칭의 효과를 예측하기가 힘들다. 현재는 과부하 해소를 위한 회로 스위칭이 대개 오프라인으로 수행되고 운용자의 경험에 의하여 결정되는 경우가 많은데, 운용자가 모든 가능한 형태에 대하여 익숙할 수는 없다.

이러한 문제점들을 해결하기 위하여 해외 선진국을 중심으로 송전선로 과부하 발생 시에 이를 해소하는 기법들에 대한 연구들이 지난 80년대부터 수행되어 왔다. Muller와 Quintana는 선로의 과부하와 전압 위반 문제를 해소하기 위하여 선로 스위칭 시퀀스의 순위를 결정하는 연구를 수행하고 소규모 시스템에 적용하였고[1], Schnyder와 Glavitsch는 제어 변수를 포함하는 스위칭 조류의 목적함수를 고려

하여 최적화하는 안전도 향상 방안을 연구하였으나 이론에 치우쳐 실제통에 적용하기는 어렵다[2]. Bijwe, Nanda, Puttabuddhi의 연구[3]에서 AC-DC 조류계산 자코비안 행렬을 활용하고 과부하와 전압의 성능 지수에 근거한 선로 탈락 순위 매김을 위한 방법이 제시되고, 소규모 시스템에 적용하였으나 과부하 해소보다 과부하를 일으키는 선로탈락의 순위 결정에 초점을 맞추고 있다. Wrubel, Rapienski, Lee, Gisin, Woodzell의 연구[4]에서 선형화된 DC모델로서 과부하를 없애거나 줄이기 위한 스위칭 후보들을 선택하고 선택된 후보들을 다시 AC 조류계산을 사용하여 결정하는 수정 스위칭 알고리즘을 제안하고 실제통에 적용하는 연구를 수행하였으나, DC와 AC 조류계산을 중복하여 적용하여야 한다. Shao와 Vittal의 연구[5]에서 선로와 모선의 스위칭에 의한 어드미턴스 행렬의 변화를 구하고 이를 활용하여 과부하와 전압 위반 문제를 해소하기 위한 알고리즘이 제안되고, 소규모 시스템에 적용하였다. 그러나 수정된 어드미턴스 행렬을 구하기가 복잡하고 이의 역행렬을 구하는 등 실제통 적용이 쉽지 않다. 전력시스템의 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 실제통 적용의 연구는 많지 않았다.

본 논문에서는 최선의 해를 쉽게 찾을 수 있도록 하기 위하여, 각 선로의 탈락이나 투입이 아니라 각 선로의 임피던스 변화에 대한 과부하 선로 조류의 민감도를 통하여 과부하 선로를 해소하기 위한 여유 송전선로의 투입과 운전 중인 선로의 차단을 한꺼번에 체계적으로 수행하는 새로운 스위칭 알고리즘이 제시된다. 이러한 민감도에 근거한 과부하 해소 기법의 새로운 알고리즘을 적용하여 수많은 케이스의 스위칭 경우의 수를 대폭적으로 줄임으로써 효율적으로 선로 스위칭 조합을 구하고, 효과적인 과부하 해소 대책을 세우는 방안을 제시한다. 이를 소규모 시스템에 적용하고, 그 시뮬레이션 결과로서 제시된 알고리즘의 효과를 보여 준다.

2. 선로 조류 방정식과 민감도에 근거한 과부하 해소 알고리즘

2.1 전력시스템에서의 선로 조류

발전기, 송전선, 변압기, 부하, 제어설비 등이 복잡하게 조합되어 전력을 생산, 수송, 배분하는 전력시스템에서의 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 i 의 전압을 페이지로 표현하여 \overline{V}_i 라 두고 모선 i 에서 모선 j 로 흐르는 전류를 \overline{I}_{ij} 이라고 두면, 모선 i 에서 모선 j 로 흐르는 유효전력(P_{ij})과 무효전력(Q_{ij})은

$$\overline{V}_i \overline{I}_i = P_{ij} + jQ_{ij}^* \quad (1)$$

으로 표현된다. 여기서 *는 공액복소수를 의미하고, 윗 줄(-)은 페이지를 나타낸다. 모선 i 와 모선 j 사이의 선로 어드미턴스를 페이지로 표시하여 \overline{y}_{ij} 라고 두면 이것은 다시 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{ij} + jQ_{ij} &= \overline{V}_i \overline{I}_{ij}^* \\ &= \overline{V}_i [\overline{y}_{ij}^* (\overline{V}_i - \overline{V}_j)] \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, 극좌표(polar form)로 변환하여

$$\overline{y}_{ij} = y_{ij} e^{j\theta_{ij}} \quad (3)$$

$$\overline{V}_i = V_i e^{j\delta_i} \quad (4)$$

$$\overline{V}_j = V_j e^{j\delta_j} \quad (5)$$

라고 두면, 식 (2)는

$$\begin{aligned} P_{ij} + jQ_{ij} &= \overline{V}_i \overline{I}_{ij}^* \\ &= V_i e^{j\delta_i} [y_{ij} e^{-j\theta_{ij}} (V_i e^{-j\delta_i} - V_j e^{-j\delta_j})] \\ &= y_{ij} (V_i^2 e^{-j\theta_{ij}} - V_i V_j e^{j(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})}) \end{aligned} \quad (6)$$

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

이 식 (6)을 모선 i 에서 모선 j 로 흐르는 유효전력(P_{ij})과 무효전력(Q_{ij})으로 분리해서 나타내 보면,

$$P_{ij} = y_{ij} [V_i^2 \cos(\theta_{ij}) - V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})] \quad (7)$$

$$Q_{ij} = -y_{ij} [V_i^2 \sin(\theta_{ij}) + V_i V_j \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})] \quad (8)$$

을 얻을 수 있고 위의 식 (7)이 유효 선로 조류 방정식, 아래 식 (8)이 무효 선로 조류 방정식이다. 이러한 한 쌍의 선로 조류 방정식은 각 선로 마다 존재하므로 L 개의 선로가 존재하는 전력 시스템이라면 모두 $2L$ 개의 선로 조류 방정식이 존재하게 된다.

과부하 선로가 존재한다면 이 과부하선로들을 평가 선로로 정하고, 이 과부하 선로들에 흐르는 유효전력의 합 (P_{over})은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{over} &= \sum_{i,j \in N_L} |y_{ij}| [V_i^2 \cos(\theta_{ij}) \\ &\quad - V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})] \\ &= \sum_{l \in N_L} P_l \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 N_L 은 과부하선로의 집합을 나타내고, l 은 과부하선로, P_l 은 과부하선로 l 의 유효전력의 크기를 나타낸다.

2.2 새로운 민감도에 근거한 과부하 해소 알고리즘

선로의 조류를 나타내는 위의 식 (7)과 (8)로부터

선로의 조류의 크기 LF^0 를 구하여 과부하 선로가 있는지를 체크한다. 과부하 선로가 존재한다면 아래의 절차를 거쳐 선로 과부하를 해소할 수 있다.

먼저 제어 설비를 적용하기 전인 초기의 각 과부하 선로 조류의 정격용량에 대한 비의 m 제곱의 합을 LF^0 로 나타내면, 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$LF^0 = \sum_{l \in N_L} \left(\frac{P_l^0}{P_{Rl}} \right)^m \quad (10)$$

여기서 m 은 자연수로 웨이팅을 줄 수 있다. 여기서는 간단하게 하기 위해 m 의 값으로 1을 적용하는 것으로 한다. P_l^0 는 제어 설비를 동작시키기 전의 과부하선로 l 의 유효전력을 나타내고 P_{Rl} 은 과부하선로 l 의 정격용량을 나타낸다.

선로 과부하를 해소하기 위한 대책을 수립하기 위하여 먼저 과부하 선로들의 선로 임피던스에 대한 선로 조류 민감도를 계산한다. 각 선로의 임피던스를 일정 비율로 변화시키고 과부하 선로의 새로운 전력조류의 정격용량에 대한 비의 크기의 합 LF^c 를 계산한다.

$$LF^c = \sum_{l \in N_L} \left(\frac{P_l^c}{P_{Rl}} \right)^m \quad (11)$$

P_l^c 는 선로 스위칭을 수행한 후의 과부하선로 l 의 유효전력을 나타낸다.

선로 임피던스 변화에 따른 과부하 선로들의 LF 의 변화량, 즉 선로 임피던스에 대한 선로조류 민감도 ΔLF^c 를 아래와 같이 정의한다.

$$\Delta LF^c = LF^c - LF^0 \quad (12)$$

이 ΔLF^c 를 계산하고 절대치를 계산하여 랭킹을 매기고 적절한 개수인 n 개의 랭킹리스트를 작성한다. 각 선로의 임피던스를 일정 비율로 변화시킬 때 일률적으로 증가시킬 수도 있고 감소시킬 수도 있다. 임피던스를 일정 비율로 증가시키는 경우를 고려하면, 선로 임피던스에 대한 선로조류 민감도 ΔLF^c 의 절대치의 순서대로 스위칭을 수행하되, ΔLF^c 의

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 투입시키고, 동일하게 조류계산을 수행하고 과부하 해소 효과를 계산한다. 투입시킬 선로가 없으면 다음 순위의 스위칭 대상선로로 넘어가고 대상 리스트에서 제외시킨다. 최선의 해를 쉽게 찾을 수 있도록 하기 위하여, 각 선로의 탈락이나 투입이 아니라 각 선로의 임피던스 변화에 대한 과부하 선로 조류의 민감도를 통하여 과부하 선로를 해소하기 위한 여유 송전선로의 투입과 운전 중인 선로의 차단을 한꺼번에 체계적으로 수행할 수 있다.

이 과정을 거쳐 과부하 선로 조류의 경감 순위를 결정하고, 이 순위대로 선로들의 스위칭을 수행하고, 매번 선로조류를 계산하여 만족한 수준에 이를 때까지 스위칭 조작을 중첩하여 수행한다. 과부하 선로들 중의 어느 하나라도 정격에서 벗어나는 방향으로 변화시키는 선로 스위칭은 버린다. 스위칭은 과부하가 해소되면 더 이상 수행하지 않는 것으로 하며, 가능한 스위칭의 횟수를 최소화하는 방향으로 스위칭을 수행한다. 만족한 수준에 도달하면 선로 스위칭 시퀀스들을 사용하여 선로 과부하 해소 대책을 수립하여 종료되며, 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 정리하면 아래와 같다.

- 1) 시스템 데이터 입력 및 전력조류 계산 수행
- 2) 선로 과부하 체크. 선로 과부하가 있으면 아래 단계로 진행하고 없으면 종료
- 3) 식 (12)의 선로 임피던스에 대한 선로 조류 민감도 ΔLF^c 계산하고 이의 절대치 순서대로 n 개의 스위칭 선로 순위 매김
- 4) n 개의 스위칭 선로에 대하여 ΔLF^c 의 절대치 순서대로 ΔLF^c 의 부호가 음이면 선로 차단 스위칭, 부호가 양이면 여분의 선로 투입 스위

송전선로 과부하를 해소하기 위한 민감도에 근거한 알고리즘 연구

칭 수행하는 과부하 선로 조류 경감 순위 리스트 작성

- 5) 과부하 선로 조류 경감 순위 리스트에 따라 다른 선로들의 조류조건도 만족되면서 모든 선로 과부하가 해소될 때까지 순서대로 스위칭을 중첩하여 수행. 과부하 선로들 중의 어느 하나라도 정격을 벗어나는 방향으로 변화시키는 선로 스위칭은 버림.
- 6) 모든 리스트의 스위칭 수행 후에도 과부하가 해소되지 않으면 선로 스위칭 이외의 해소 대책이 요구됨.
- 7) 과부하가 해소되면 선로 스위칭 시퀀스들을 과부하 해소 대책으로 수립하고 종료됨.

본 논문에서 제안된 과부하 해소대책 수립 알고리즘을 플로우차트로 나타내면, 그림 1과 같다.

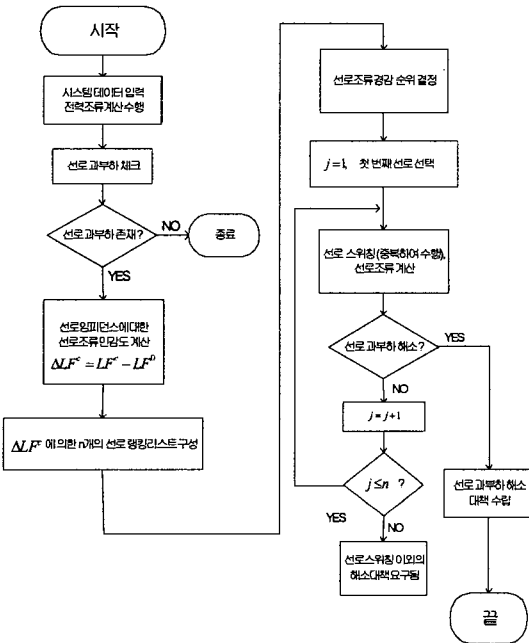


그림 1. 새로운 과부하 해소대책 수립 알고리즘 플로우차트
Fig. 1. The flowchart of a new algorithm for alleviating overloads

3. 사례 연구

본 논문에서 제시하는 과부하 해소대책 수립 알고

리즘을 전력시스템에 적용하기 위해 IEEE 39 모션 테스트 시스템을 사용하였다(그림 2). 10기의 발전기와 39개의 모션과 46개의 선로가 있다.

여기서는 선로 스위칭을 수행하여 선로 과부하를 해소하는 목적이므로 발전기 모션에 방사상 모양으로 연결된 선로들은 발전기의 출력을 조정하거나 부하를 조정하지 않으면 선로부하를 감소시킬 방법이 없으므로 여기서는 고려하지 않으며, 해를 구하는 알고리즘의 적용이 가능하도록 과부하가 해소되는 해가 존재하는 조건을 만들어 주기 위하여 고려 대상인 과부하 선로를 제외하고는 각 선로들에 동일한 종류의 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 적용의 편의를 위하여 유효전력에 대하여 본 알고리즘을 적용한다. 이 시스템의 선로조류를 계산하여 방사상으로 연결되어 선로 스위칭에 의하여 조정할 수 없는 선로들을 제외하고, 상위 10개의 유효전력의 선로 조류를 나타내 보면 표 1과 같다.

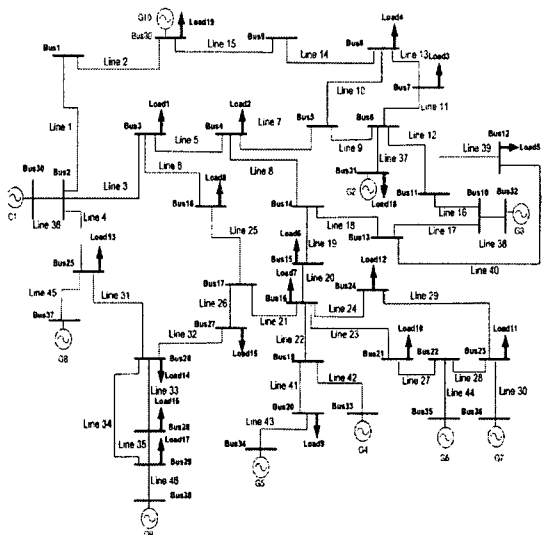


그림 2. IEEE 39 모션 테스트 시스템
Fig. 2. IEEE 39 bus system for testing

표 1. 선로의 조류
Table 1. Line flows

No	선로 번호	From bus	To bus	선로 조류 (유효전력[MW])
1	9	5	6	-444.1
2	3	2	3	416.5
3	27	21	22	-411.1
4	11	6	7	372.6
5	35	28	29	-347.4
6	17	10	13	331.2
7	18	13	14	327.5
8	16	10	11	318.8
9	12	6	11	-313.2
10	32	26	27	312.2

위의 표에서 400[MW] 이상의 조류가 흐르는 선로가 3개 선로가 존재한다는 것을 알 수 있는데, 선로조류의 양의 부호는 From bus에서 To bus로 조류가 흐르고, 선로조류의 음의 부호는 To bus에서 From bus로 조류가 역방향으로 흐른다는 것을 나타낸다. 본 논문에서는 제시되는 알고리즘의 과부하 해소 효과 검증용 좀 더 쉽도록 하기 위해, 과부하 해소의 고려 대상인 과부하선로는 제외하고 다른 선로에는 투입이 가능한 여분의 동일한 선로가 존재하는 것으로 가정한다.

먼저 제일 조류가 많은 9번 선로만을 과부하로 고려하여 평가선로로 선정하는 경우를 고려한다. 이 경우 9번 선로의 정격용량을 400[MW]라고 가정한다. 9번 선로만에 대하여서만 제시한 알고리즘에 의하여 선로조류 민감도 ΔLF^c 를 절대값의 순위대로 5순위 까지만 표로 제시해 보면 표 2와 같다. 표 2를 보면 첫 번째 스위칭 선로는 11번 선로이고 선로조류 민감도 ΔLF^c 의 부호가 양이므로 여분의 선로를 투입하고, 두 번째 스위칭 선로는 10번 선로이고 선로조류 민감도 ΔLF^c 의 부호가 음이므로 이 선로를 차단한다. 순서대로 스위칭을 수행하여 나가되, 가능하면 스위칭 횟수를 최소화하는 방향으로 스위칭을 수행하는 것으로 하며, 스위칭 후에 적정 수준으로 과부하가 해소되었다고 판단되면 스위칭을 종료한다. 표 2의 순서에 맞추어 제시된 알고리즘을 따라서

스위칭을 수행하여 보면 11번 선로의 여유 송전선로를 투입하고 10번 선로를 차단하는 것으로 순위가 매겨지고, 적정 수준으로 과부하가 해소될 때까지 스위칭이 계속된다.

이러한 선로 스위칭을 수행하였을 때의 결과가 표 3에 제시되어 있다. 2번의 선로 스위칭으로 스위칭하기 전의 -444.1[MW]의 선로 조류에서부터 크게 감소하였음을 보여준다.

표 2. 과부하 선로인 9번 선로에 대한 선로조류 민감도

Table 2. The sensitivity of the line flow for the overload line 9

No	스위칭 선로	선로조류 민감도 ΔLF^c
1	11	0.36155
2	10	-0.31735
3	18	0.15575
4	7	-0.1206
5	12	-0.1198

표 3. 선로 스위칭 후의 9번 선로의 유효전력

Table 3. The active power in the line 9 after line switching

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 유효전력 선로조류의 상위 3개 선로인 9번, 3번, 27번의 선로들의 정격용량을 똑같이 400[MW]라고 가정하여, 각 선로의 정격보다 높은 과부하 선로라고 가정한다. 410[MW] 이상의 선로조류에서 약간 여유 있게 모두 380[MW] 이하의 선로조류로 감소시켜 선로 스위칭을 통하여 선로조류 과부하를 해소하는 대책을 수립해 본다. 선로조류의 상위 3개 선로인 9번, 3번, 27번의 선로들에 대하여 제시한 알고리즘에 의하여 선로조류 민감도 ΔLF^c 를 절대값의 순위대로 5순위까지 제시해 보면 표 4와 같다. 이 3개 과부하 선로에 대하여 제시한 알고

리즘을 적용하여 순위를 매겨서 순서대로 적용을 해 보면, 표 4로부터 11번 선로, 29번 선로, 32번 선로, 31번 선로의 여유 선로를 투입하고 다음으로 23번 선로를 차단하는 것으로 결정된다. 이러한 선로 스위칭을 수행하였을 때의 결과가 표 5에 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] 이하인 것을 보여준다. 이의 값을 더 감소시키기 위하여서는 스위칭을 더 많이 수행하여야 하며, 가장 이상적인 경우는 모든 선로의 조류가 평균적인 값을 가질 때이지만 이것은 현실적으로 불가능하고, 과부하 선로의 과부하를 해소하는 목적으로 스위칭을 하기 때문에 이 과부하선로의 조류를 너무 낮추는 경우에는 다른 정상조류의

선로에 과부하가 흐르게 되는 경우가 발생하게 되므로, 어느 정도 이하로는 감소시킬 수 없는 상황에도 달하게 된다. 따라서, 과부하 조건을 해소하는 운전 조건이면 된다고 본다.

이 시뮬레이션 결과를 통하여 본 논문에서 제시된 새로운 민감도에 근거한 과부하 해소 기법의 알고리즘이 송전선로 과부하 해소에 효과적으로 적용될 수 있음을 보여준다.

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 스위칭은 전력시스템 운용에서 자주 수행되는 일반적인 조작이 아니고 수많은 케이스의 가능한 선로 스위칭이 존재하기 때문에 실제 운전상황을 판단하여 신뢰할 만한 스위칭 전략을 제시하기에는 운용자가 충분한 경험을 가지고 있지 않은 경우도 많으며 또한 경험 있는 운전자라 하더라도 모든 가능한 형태에 익숙할 수는 없다.

본 논문에서는 최선의 해를 쉽게 찾을 수 있도록 하기 위하여, 각 선로의 탈락이나 투입이 아니라 각 선로의 임피던스 변화에 대한 과부하 선로 조류의 민감도를 통하여 과부하 선로를 해소하기 위한 여유 송전선로의 투입과 운전 중인 선로의 차단을 한꺼번에 체계적으로 수행하는 새로운 스위칭 알고리즘이 제시된다. 이러한 민감도에 근거한 과부하 해소 기법의 새로운 알고리즘을 적용하여 수많은 케이스의 스위칭 경우의 수를 대폭적으로 줄임으로써 효율적으로 선로 스위칭 조합을 구하고, 효과적인 과부하 해소 대책을 세우는 방안을 제시한다. 제시된 민감도에 근거한 과부하 해소 기법의 알고리즘을 소규모 시스템에 적용하고 그 시뮬레이션 결과로서 제시된 알고리즘의 효과를 보여준다.

제시된 알고리즘에 근거한 과부하 해소 기법이 프로그램으로 자동화 된다면 전력설비의 운용자에게

표 4. 과부하 선로인 9번, 3번, 27번 선로에 대한 선로조류 민감도

Table 4. The sensitivity of the line flow for overload lines 9, 3 and 27

No	스위칭 선로	선로조류 민감도 ΔLF°
1	11	0.72305
2	29	0.70855
3	32	0.20962
4	31	0.19419
5	23	-0.13286

표 5. 선로 스위칭 후의 과부하 선로들의 유효전력

Table 5. The active powers in overload lines after line switching

스위칭 회수	스위칭 선로	스위칭 동작	스위칭 후의 선로 조류 (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

큰 도움을 줄 수 있고, 효과적인 과부하 해소대책을 적용할 수 있으며 설비를 보호하고 선로 과부하로 인한 정전 사고 확대를 방지할 수 있으므로 안정적 전력 공급에 기여할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 부분적으로 인천대학교 2007년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

References

- [1] 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, pp.246-253, July 1989.
- [2] G. Schnyder, and H. Glavitsch, "Security enhancement using an optimal switching power flow", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 5, No. 2, pp. 674-681, 1990.
- [3] 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, pp. 207-212, 1991.
- [4] J. N. Wrubel, P. S. Rappieski, 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, pp. 415-421, 1996.
- [5] W. Shao and V. Vittal, "A new algorithm for relieving overloads and voltage violations by transmission line and bus-bar switching", IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, Vol. 1, pp. 322-327, 10-13 Oct. 2004.

◇ 저자소개 ◇

이병하 (李丙河)

1954년 7월 12일생. 1978년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1980년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 The Pennsylvania State Univ. 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1979~1994년 한국전력공사 기술연구원 선임연구원. 2007~2008년 Univ. of Illinois Visiting Professor. 1994년~현재 인천대학교 전기공학과 교수.

백정명 (白正明)

1980년 5월 5일생. 2007년 인천대학교 전기공학과 졸업. 현재 동대학원 석사과정.