

한국형 EMS용 송전손실계수(TLF) 산정프로그램 개발

정성훈*, 최영진*, 이승호*, 민경일*, 문영현*, 김홍래**, 이육화#, 윤상윤#, 김선구##, 허성일##
 *연세대학교, **순천대학교, #LS산전, ##전력거래소

TLF(Transmission Loss Factor) Program Development in K-EMS

Sung-Hun Jung*, Young-Jin Choi*, Seung-Ho Lee*, Kyung-Il Min*, Young-Hyun Moon*, Hong-Rae Kim**, Wook-Hwa Lee#, Sang-Yun Yun#, Seon-Gu Kim##, Seong-Il Hur##

*Yonsei Univ., **Soonchunhyang Univ., #LS Industrial System, ##Korea Power Exchange

Abstract - 본 논문은 국책사업으로 진행되는 한국형EMS(K-EMS :Korean Energy Management System)의 응용프로그램 중 하나인 TLF(Transmission Loss Factor)산정 프로그램에 대해 중요 알고리즘과 전반적인 기능에 대해서 기술하였다.

1. 서 론

1990년대 이후 전력산업 구조개편으로 발전과 송전, 배전/판매 부문이 일부 또는 전부 분할됨에 따라 전력시장개념이 도입되었다. 기존의 수직 통합적인 환경에서 생산부분과 판매부분이 나누어짐에 따라 쌍방 간의 거래가 생기게 되었으며, 그에 따라 기존의 전력계통운명을 위한 기존의 EMS에 부가하여 전력시장운영시스템(MOS : Market Operating System)이 필요하게 되었고 이런 정보시스템은 보다 높은 신뢰도와 정확성을 요구하게 되었다. 이에 따라 현재 한국전력거래소에서는 전력계통 운영 기능과 전력시장 운영기능이 상호 유기적으로 결합된 시스템 구축사업인 한국형EMS(K-EMS)개발을 국책사업으로 추진 중에 있다.[1]

지금 서술하고자 하는 프로그램은 이 K-EMS의 응용프로그램의 하나인 송전손실계수(TLF : Transmission Loss Factor) 산정프로그램이며 이 프로그램은 발전기, 부하, 용통신로별 송전손실계수의 실시간 값과 검토용 값을 제공하고 있다. 실시간 값은 경제급전(ED : Economic Dispatch)의 페널티계수(Penalty Factor)를 제공하기 위한 것이며, 검토용 값은 실시간 값이 비정상적인 경우 대처 할 수 있는 값을 제공한다. 더불어 송전손실 비용 산정 시 활용될 수 있는 기본 자료로도 사용 될 수 있다.

본 논문에서는 송전손실계수 산정프로그램의 기본 알고리즘과 이 프로그램의 제공하고 있는 실시간 값과 검토용 값의 산정 과정 및 기능에 대해 서술하고자 한다.

2. 본 론

2.1 송전손실계수 계산

송전손실계수의 계산방법을 요약하면 다음과 같다[2]. 먼저 모선 i, j, k와 slack모선이 있다고 가정하고 모선 i에서 만 전력이 ΔP_{Gi} 만큼 변화가 발생하였다고 하면

$$P_{Gi}^{new} = P_{Gi}^{old} + \Delta P_{Gi} \quad (1)$$

그리고 부하는 일정하게 유지된다고 하면, 슬랙모선에서의 전력 변화는 다음과 같다.

$$P_{slack}^{new} = P_{slack}^{old} + \Delta P_{slack} \quad (2)$$

여기서 아무것도 변화되지 않는다면, 이 계통의 변화는 손실의 변화를 야기한다. 즉,

$$\Delta P_{slack} = -\Delta P_{Gi} + \Delta P_{loss} \quad (3)$$

이 때 i번째 모선에 대한 손실 계수를 정의하면,

$$S_i = \frac{\partial P_{loss}}{\partial P_{Gi}} \quad (4)$$

발전 모선 i에서의 손실 계수 계산을 위해서 모선 i에서만 ΔP_{Gi} 만큼 전력 증가시킬 경우에 대한 손실 증가분 ΔP_{Loss} 를 계산하면 된다. 식 (3)을 이용하면 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\frac{-\Delta P_{slack}}{\Delta P_{Gi}} = \frac{(\Delta P_{Gi} - \Delta P_{loss})}{\Delta P_{Gi}} = 1 - \frac{\partial P_{loss}}{\partial P_{Gi}} = 1 - S_i \quad (5)$$

$$S_i = 1 + \frac{\partial P_{slack}}{\partial P_{Gi}}$$

손실계수의 계산은 Newton-Raphson 조류계산법으로부터 유도할 수

있다. i모선에서 발전량이 ΔP_i 만큼 변화하면 모든 모선의 전압크기 및 위상각에 미소변화가 생긴다. 기준 모선의 유효 전력방정식에서

$$\Delta P_{slack} = \sum_{i=1, i \neq s}^N \frac{\partial P_{slack}}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i + \sum_{i=1, i \neq s}^N \frac{\partial P_{slack}}{\partial |E_i|} \Delta |E_i| \quad (6)$$

$$\begin{aligned} &= \sum_{i=1, i \neq s}^N \frac{\partial P_{slack}}{\partial \theta_i} \left(\sum_{j=1, j \neq s}^N \frac{\partial \theta_i}{\partial P_j} \Delta P_j \right) + \sum_{i=1, i \neq s}^N \frac{\partial P_{slack}}{\partial |E_i|} \left(\sum_{j=1, j \neq s}^N \frac{\partial P_{slack}}{\partial P_j} \Delta P_j \right) \\ &= \sum_{i=1, i \neq s}^N \frac{\partial P_{slack}}{\partial \theta_i} \left(\sum_{j=1, j \neq s}^N \frac{\partial \theta_i}{\partial Q_j} \Delta Q_j \right) + \sum_{i=1, i \neq s}^N \frac{\partial P_{slack}}{\partial |E_i|} \left(\sum_{j=1, j \neq s}^N \frac{\partial P_{slack}}{\partial Q_i} \Delta Q_i \right) \\ &\therefore \frac{\partial P_{slack}}{\partial P_{Gk}} = \sum_{i=1, i \neq s}^N \frac{\partial \theta_i}{\partial P_k} \frac{\partial P_{slack}}{\partial \theta_i} + \sum_{i=1, i \neq s}^N \frac{\partial |E_i|}{\partial P_k} \frac{\partial P_{slack}}{\partial |E_i|} \quad (7) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial P_{slack}}{\partial Q_{Gk}} = \sum_{i=1, i \neq s}^N \frac{\partial \theta_i}{\partial Q_k} \frac{\partial P_{slack}}{\partial \theta_i} + \sum_{i=1, i \neq s}^N \frac{\partial |E_i|}{\partial Q_k} \frac{\partial P_{slack}}{\partial |E_i|} \quad (8)$$

(Note: $P_k = P_{Gk}$ in the concerned case)

식 (8)로부터 i모선의 발전 변화량 ΔP_i 에 대한 슬랙모선의 발전 변화량 ΔP_{slack} 의 비를 구할 수 있고, 이것으로부터 손실계수를 구할 수 있다. 이를 행렬로 표시하면,

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_{slack}}{\partial P_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial P_{slack}}{\partial P_N} \\ \frac{\partial P_{slack}}{\partial Q_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial P_{slack}}{\partial Q_N} \end{bmatrix} = [J^{-1}]^T \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{slack}}{\partial \theta_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial P_{slack}}{\partial \theta_N} \\ \frac{\partial P_{slack}}{\partial |E_1|} \\ \vdots \\ \frac{\partial P_{slack}}{\partial |E_N|} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} S_i &= 1 + \frac{\partial P_{slack}}{\partial Q_{Gi}} = 1 + \sum_{i=1, i \neq s}^N \frac{\partial \theta_k}{\partial P_{Gi}} \frac{\partial P_{slack}}{\partial \theta_k} + \sum_{i=1, i \neq s}^N \frac{\partial |E_k|}{\partial P_{Gi}} \frac{\partial P_{slack}}{\partial |E_k|} \\ &\approx 1 + \sum_{i=1, i \neq s}^N \frac{\partial \theta_k}{\partial P_{Gi}} \frac{\partial P_{slack}}{\partial \theta_k} \end{aligned} \quad (10)$$

2.2 프로그램 알고리즘

TLF 프로그램의 알고리즘은 그 역할에 따라 데이터 입력부분, TLF 값 계산부분, 데이터 검토 및 출력부분(실시간, 검토용)으로 크게 3부분으로 나누어 진다.

(1) 선행 프로그램의 결과값 입력

- SE(State Estimation) 프로그램에서 계산되어 나온 모선별 전압과 위상각을 받는다.
- ACM(Application Common Model)에서 필요한 입력 데이터 값들을 불러들인다 (필요한 영역만 Local Header로 처리함)

(2) Ybus구성, Jacobian(H-Matrix) 계산 등 실시간 TLF값을 계산

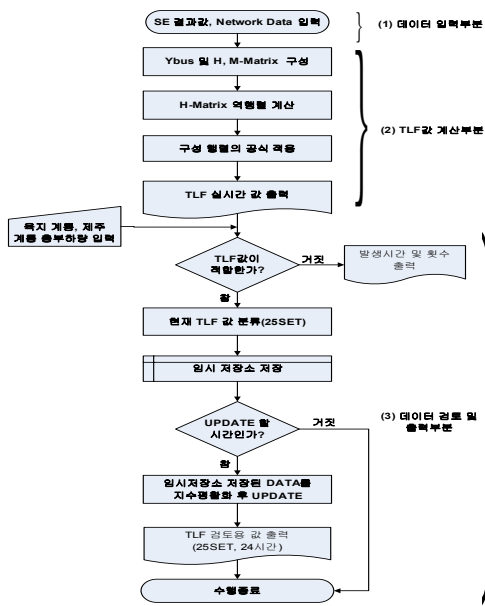
- Network Data를 이용하여 Ybus를 구성한다.
- 선행 프로그램에서 출력된 SE결과치 (V, θ)를 이용하여 모선 간 위상각을 계산한다.

- 구성된 실수부, 허수부 Y_{bus} , SE결과치 (V, θ)와 계산된 도선간 위상각을 이용하여 H-Matrix를 구성한다.
- 위와 같은 방식으로 M-Matrix를 구성한다.
- 3 단계에서 구성된 H, M-Matrix를 Gauss Elimination을 통하여 $\frac{\partial P_{slack}}{\partial P_N}$ 를 계산한다.
- 계산된 결과를 식(10)을 이용하여 손실계수 구한다.

(3) 실시간 TLF값을 바탕으로 검토용 값을 계산 및 출력

- 실시간 값이 ACM에 입력되어 있는 정상범위 내에 존재여부를 확인하여 적합성 여부를 판단한다. (정상범위의 입력은 계통운영자가 변경가능하다)
- 비적합한 값일 경우 발생한 시간, 연속발생 횟수, 정상복귀 시간을 출력한다.
- 정상범위내의 실시간 값은 25가지 패턴과 시간별로 나누어져 임시폴더에 누적시킨다.
- 1시간 단위로 시간이 변하면 25가지 패턴과 시간별로 누적된 값을 기본으로 검토용 값을 업데이트한다.
- 출력된 검토용 값은 ACM에 입력한다.

아래 알고리즘을 바탕으로 한 프로그램의 순서도는 그림 1과 같다.



<그림1> TLF 프로그램 순서도

2.3 프로그램 Output data 및 기능

송전손실계수는 ED(Economic Dispatch), UC(Unit Commitment), ETS(Energy Transaction Studies)을 위해 계산된다. 이런 기능을 제공하기 위해서는 손실계수는 실시간과 검토용 데이터 둘 다 계산하여야 한다. 따라서 이 프로그램에서는 손실계수를 실시간용과 검토용으로 분류하였으며, 검토용 데이터는 각 데이터의 특징에 따라 25가지 패턴별, 시간별로 분류하였다.

2.3.1 실시간 송전손실계수 데이터

실시간 송전손실 데이터는 ED에 즉각적으로 사용되는 데이터로써 발전기, 부하, 용동선로 별 송전손실계수 출력한다. 또한 계산된 데이터 값이 비정상적일 경우 데이터가 발생한 시간, 연속적으로 발생한 횟수, 정상값으로 복귀한 시간을 검토용 데이터에서 불러와 실시간 데이터와 같이 화면에 출력하게 되며 실행프로그램의 실행 후 업데이트 된다.

2.3.2 검토용 송전손실계수 데이터

검토용 데이터는 실시간 데이터가 비정상일 경우 이를 대처하기 위한 것이다. 또한 이 데이터는 조류패턴별, 시간별 평균 데이터를 제공하기 때문에 ED, UC, ETS에 활용 될 수 있는 기본 자료로도 사용된다. 따라서 실시간 데이터는 25가지 다양한 조류패턴과 하루 24시간 기준으로 시간별로 검토된다. 다음은 각 검토용 데이터는 특성에 따라 분류하였다.

(a) 25가지 연계조류 패턴별 분류

- 패턴 기준 : 패턴별 기준은 ACM에 입력되어 있는 육지에서의 5

가지 부하레벨과 제주에서의 5가지 부하레벨을 기준으로 총 25가지의 조류패턴기준을 가지며 이 기준으로 각각의 발전기, 부하, 용동선로의 패턴별 검토용 값을 제공하게 된다.

※ 각 기준은 기존 데이터 및 경험치를 바탕으로 계통운영자에 의해 조정될 수 있다

- 산정 방법 : 패턴별 데이터는 1시간 누적을 기본으로 한다. 그 이유는 프로그램이 매 실행 시 마다 업데이트를 실행하면 지수평활시 최근값의 비중이 과도하게 높아지므로 검토용 데이터로써 의미를 상실하게 되기 때문이다. 따라서 본 프로그램에서는 1시간동안 누적된 실시간 패턴별 데이터의 평균치를 기존 데이터와 지수평활화하여 업데이트 한다. 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$X_t = \left(\sum_{r=1}^N X_r \right) / N \tag{11}$$

$$X^{new} = \alpha X_t + (1 - \alpha) X^{old} \tag{12}$$

※ X_t 는 평균치, X_r 는 패턴별 실시간 값, N 은 1시간동안 발생 횟수, X 는 패턴별 검토용 값, α 는 smoothing constant를 나타낸다.

(b) 시간별 분류

- 시간기준 : 시간기준은 메인서버가 제공하는 시각을 기준으로 하며 각 시간별 데이터는 1일 1회 업데이트 된다. 따라서 시간별 검토용 값은 시간이 경과됨에 따라 그 신뢰도가 증가하며 이 검토용 값 또한 패턴별 검토와 같이 각각의 발전기, 부하, 용동선로에 대해 검토용 값을 제공한다.

- 산정 방법 : 시간별 검토용 값을 제공하기 때문에 1시간 누적을 기본으로 하며, 누적 시 비정상적인 실시간 데이터는 필터링되기 때문에 비정상값에 의한 값의 급격화 변화를 사전에 차단하였다. 산정 방법은 1시간 동안 누적된 실시간 값을 프로그램 실행 횟수(비정상 데이터 횟수 제외)로 평균치 산정 후 기존 데이터와 지수평활화하여 업데이트 한다. 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$Y_t = \left(\sum_{r=1}^N Y_r \right) / N \tag{13}$$

$$Y^{new} = \alpha Y_t + (1 - \alpha) Y^{old} \tag{14}$$

※ Y_t 는 평균치, Y_r 는 실시간 값, N 은 1시간동안 프로그램 실행 횟수, Y 는 시간별 검토용 값, α 는 smoothing constant를 나타낸다.

(c) 비정상 송전손실계수 데이터처리

비정상 송전손실계수는 검토용 데이터 처리에 가장 중요한 사항이다. 단 한번의 비정상값이 검토용 데이터 처리에 반영되면 검토용 데이터는 그 기능을 상실하기 때문이다.

- 설정기준 : 손실계수의 상한값과 하한값은 ACM에 입력되어 있는 값을 사용하며 상·하한값의 설정은 계통운영자가 기존 데이터 및 경험치로 설정하며 수시로 조정할 수 있다. 이 기준은 모든 발전기, 부하, 용동선로에 적용된다.

- 기능 : 상·하값을 설정하여 이 범위를 벗어날 경우 그 데이터는 필터링 되어 검토용 값에 적용되는 것을 방지한다. 그와 동시에 발생한 시간, 비정상값의 연속 발생횟수, 정상범위내이로 복귀한 시간을 기록하게 된다. 또한 실시간 데이터와 같이 화면이 구성되어 사고발생 시 화면알람이 작동되어 계통운영자가 이를 즉각적으로 인지하고 대처 할 수 있도록 한다.

3. 결 론

본 논문은 한국형 EMS의 응용프로그램의 하나인 송전손실계수 산정 프로그램에 대해서 기술하였다. 송전손실계수를 구하기 위한 수학적 함수와 그에 따른 중요 알고리즘에 대해 설명하였으며 이 프로그램이 제공하고 있는 출력값을 실시간과 검토용값으로 나누었으며, 검토용 값은 25가지 패턴별 분류, 시간별 분류, 비정상 데이터처리로 나누어 그 기능과 의미에 대해서 설명하여 프로그램 이해에 도움을 주었다.

본 논문은 지식경제부에서 시행한 전력산업 연구개발사업(과제번호 : R-2005-1-398-004)으로 수행되었습니다. 관계자분들께 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

[1] 이진수 외, "전력거래소의 한국형EMS 개발계획", 대한전기학회 하계학술대회, 2007
 [2] Allen J. Wood & Bruce F. Wollenberg, *Power Generation, Operation, and Control*, John Wiley & Sons, 1996