

자기여자(Self-Excitation) 방지를 고려한 시송전 선로에 관한 연구

이홍재* · 김상섭* · 박성민* · 황봉환** · 이남호***
 광운대학교 전기공학과* · 전력거래소** · 전력연구원***

Analysis Of The Primary Restorative Transmission System To Prevent Self-excitation

Hung-Jae Lee* · Sang-Seop Kim* · Sung-Min Park* · Bong-Hwan Hwang** · Nam-Ho Lee***
 KwangWoon University* · Korea Power Exchange** · Korea Electric Power Research Institute***

Abstract - Service restoration following a complete or partial collapse starts with reenergize a transmission line from black-start generators. Voltage problems can arise by Ferranti effect as unloaded transmission line is reenergized.

This paper presents analytical results on the primary restorative transmission system focused on the voltage problem during the early restoration process. Methodologies to handle load pick-up compensating Ferranti effect, and terminal voltage and reactive capability limitation of black-start generators about self-excitation are presented. An algorithm for static analysis about these methodologies is developed, and EMTDC simulation for verifying the efficiency of the algorithm is performed.

1. 서 론

광역정전이나 전정전 발생 시 복구 과정은 중앙집중형과 병렬형이 있다. 중앙집중형 방식은 복구 시간이 많이 소요되어 정전 시간과 경제적 손실이 비례하는 이러한 상황에서는 적합하지 않은 방식이므로, 일반적으로 병렬형 방식을 취한다[1-6]. 이 방식은 전 계통을 여러 계통으로 분할하여 각 계통을 복구하고, 연계 선로를 통해 순차적으로 동기화 시키는 방식이다. 각 분할 계통은 하나 이상의 자체 기동 발전소를 갖고 있어야 하며, 이러한 발전소로는 정전 후 외부 전원이 없는 상태에서 자체적으로 기동할 수 있는 것으로, 소용량의 수력이나 복합발전소 등이 이에 해당된다. 이러한 발전소로부터 가장 먼저 전력 공급을 받아야 하는 우선공급 발전소와 자체 기동 발전소 사이에는 필요한 차단기(확색차단기)를 제외한 모든 차단기를 개방시킨 시송전선로로 연결되어 있다. 이 선로를 가압하여, 대용량의 가스 터빈 발전소나 복합발전소, 원자력 발전소와 같은 정전 시 외부 전원이 있어야 재기동이 가능한 우선공급 발전소에 전력을 공급하고, 이러한 발전소가 정상화된 후 계통에 병입되면 발전소 부하 및 타 발전소에 전력을 공급하여 각 분할 계통을 복구한다. 분할계통을 복구하는데 있어, 다음과 같이 고려해야 할 몇 가지 문제점들이 있다. 시송전은 무부하시의 송전선로를 가압하는 것이므로, 페란티 효과에 의한 전압 상승[2], 선로와 대지간의 어드미턴스 성분에 의한 선로 충전용량과 자체기동 발전소에서 공급할 수 있는 무효전력 한계와의 비교 등이 고려되어야 한다. 이러한 특성들은 정특성 해석으로 구해질 수 있으나, 선로 가압 시 차단기의 스위칭에 의해 발생하는 과도상태 전압이 일정 한계치를 초과할 경우 절연내력 문제가 발생 할 수 있으므로, EMTDC를 이용한 동특성 모의를 통해 스위칭 과도상태 전압을 고려해야 한다.

본 논문에서는 제시된 문제점들을 고려한 시송전 검토 이론 및 이를 위해 개발된 프로그램과 EMTDC 모의를 기반으로 시송전계통 복구에 관한 연구를 수행하였다.

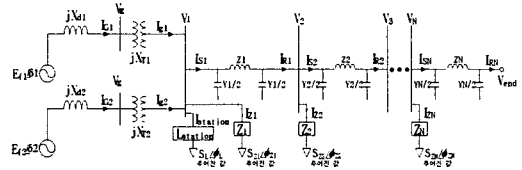


그림 1. 정특성 해석을 위한 계통구조

2. 시송전 선로 해석

시송전 선로의 정특성으로는 페란티 효과의 영향을 줄이기 위한 변전소에서의 부하 투입, 자체기동발전기의 UVR 설정 값과의 비교를 위한 발전단 전압, 자기여자 현상과 관련된 선로 충전용량 등이 해석될 수 있다.

2.1 변전소 부하 투입

그림 1에서 보듯이 각 버스에서의 부하 투입을 임의로 지정할 수 있으며, 발전기 소내부하는 송압변압기 2차측, 즉 전압 V_1 으로 표시된 버스로부터 공급된다. 우선공급발전소가 위치한 시송전 선로의 말단전압 V_{end} 를 결정하면, 시송전 조건에서 $I_{RN}=0$ 이므로, 식 (1)의 계산을 반복하여 발전기 출력전압 및 자체기동 발전기의 공급가능 무효전력을 구할 수 있다. 선로는 Π 등가 모형을 사용하였고, 전압과 전류 및 임피던스는 그림에 표시된 바와 같으며, $L_{station}$ 은 발전소의 소내부하(통상 5[%] 정도)를, V_g 는 발전기의 단자전압을 나타낸다. 투입된 부하는 V_N 버스의 정격전압과 투입된 부하 $S_{ZN} \angle \phi_{ZN}$ 에 의해 식 (2)에서 구해지는 고정부하와 이 부하가 연결된 버스에 인가된 전압과의 관계식으로부터 전류로 표현하며, 식 (3)과 같다. V_N 이 인가된 버스로 흘러 들어가는 전류는 $I_{SN} + I_{ZN}$ 이고, 위의 (1)~(3)을 반복 계산하여 $V_1, I_{Z1}, I_{S1}, I_{station}$ 까지 구한다.

$$\begin{bmatrix} V_N \\ I_{SN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{ZN \cdot YN}{2} & ZN \\ YN \left(1 + \frac{ZN \cdot YN}{4} \right) & 1 + \frac{ZN \cdot YN}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{end} \\ I_{RN} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$Z_N = \left(\frac{|V_{Nrated}|^2}{S_{ZN} \angle \phi_{ZN}} \right)^* \quad (2)$$

$$I_{ZN} = \frac{V_N}{Z_N} \quad (3)$$

2.2 발전단 전압

무부하 상태에서 송전선로를 가압하게 되면, 페란티 효과에 의해 선로 말단으로 갈수록 전압이 상승하여 수전단(우선공급발전소에 인가되는 전압)에 과전압을 야기할 수 있다. 이는 각 변전소의 버스나 변압기, 그리고 우선공급 발전기의 절연내력 문제와 직결되므로 선로의 모든 구간에서 인가되는 전압을 운용한계치 내로 유지할

$I_{S1} + I_{Z1} + I_{station} = I_S$ 라 하면,

$$I_{e1} + I_{e2} = I_S \quad (4)$$

$$I_{e1} = \frac{V_k - V_1}{jX_{Tn}}, \quad I_{e2} = \frac{V_k - V_1}{jX_{T2}} \quad (5)$$

$$I_{e1} + I_{e2} = \frac{V_k - V_1}{jX_{Tn}} + \frac{V_k - V_1}{jX_{T2}} = I_S \quad (6)$$

$$V_k = V_1 + I_S \left(\frac{jX_{Tn} \cdot jX_{T2}}{jX_{Tn} + jX_{T2}} \right) \quad (7)$$

수 있는 발전단 전압을 구하며, 이는 시송전 선로 각 구간에 대한 4단자회로 계산을 통해 다음과 같이 구할 수 있다. 그림 1에서 식 (1)을 통해 송전단 전압(V_1)을 구했으며, 발전기 단자전압(V_k)은 승압변압기(jX_{Tn}), V_1 과 I_{e1} 의 관계식으로부터 식 (7)과 같이 구한다. 단, 승압변압기의 변압비는 별도로 고려해준다.

2.3 선로 충전용량

시송전 선로의 충전용량은 선로 어드미턴스와 이에 인가되는 전압과의 관계에서 구할 수도 있지만, 이는 선로와 변압기의 인덕턴스 성분이나, 변전소에서 투입하는 지상 역률 부하의 지상 무효전력 상쇄 효과를 고려하지 못한다. 즉, 선로, 변압기, 부하의 모든 성분을 고려한 충전용량은 자체기동발전기에서 공급하는 진상 무효전력과 같다. 식 (7)에서 구한 발전기 단자전압을 식 (5)에 대입하면, 각 자체기동발전기에서 나오는 전류 I_{e1} 를 구할 수 있다. 각 발전기에서 공급하는 진상 무효전력은 이들 발전기 단자전압과 전류로부터 구한다.

3. 발전기 무효전력 공급 한계

자기여자방지를 위해서는 선로 충전용량보다 자체기동 발전소에서 공급할 수 있는 무효전력이 커야 하며, 이 공급 가능 무효전력은 발전기 회전자들의 종류에 따라 다르다. 또한, 자체기동발전기의 고정자 말단 철심과열 문제로 인한 한계값(Q_{lim})이 주어지고, 이 값이 다음에서 구할 자체기동발전소의 공급가능 무효전력보다 작을 경우는 Q_{lim} 을 무효전력 발전 한계로 설정한다.

3.1 비돌극기형

화력발전기의 경우 대부분 회전자자 원통형(비돌극기)으로 되어 있으며, 비돌극기형 발전기의 무효전력 공급 한계는 다음과 같이 구한다.

발전기의 정상상태 등가회로에서 동기임피던스를 X_d , 내부유기 기전력을 $E_f \angle \delta$, 단자전압을 $V \angle 0$ 이라 하면, 발전기의 출력 전력은 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{S} &= P + jQ = \bar{V} \bar{I}^* = \bar{V} \left[\frac{\bar{E}_f - \bar{V}}{jX_d} \right]^* \\ &= \frac{VE_f}{X_d} \sin \delta + j \left[\frac{VE_f}{X_d} \cos \delta - \frac{V^2}{X_d} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)의 P, Q를 연립하여 풀면 무효전력 발전 한계는 식 (9)와 같다. 발전기가 무한모선에 연결된 경우, 정상운용 상태에서는 동기탈조를 방지하기 위해 등면적법에 근거하여 δ 를 20° 이내로 유지한다. 그러나, 시송전의 경우 자체기동발전기가 동기탈조를 일으킬 대상이 없으므로 $\delta_{max} = 90^\circ$ 가 될 수 있으며, 자체기동발전기의 무효전력 발전 한계는 식 (10)과 같다.

$$Q = \frac{1}{\tan \delta} P - \frac{V^2}{X_d} \quad (9)$$

$$Q_{max} = -\frac{V^2}{X_d} \quad (10)$$

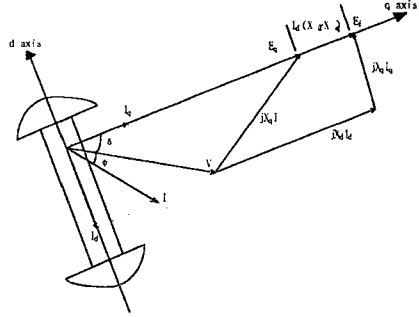


그림 2. 돌극기형 동기기의 페이지도

3.2 돌극기형

수력발전기의 경우 대부분 돌극기형 회전자를 사용하며, 비돌극기와는 달리 공극이 균일하지 않으므로 돌극기의 경우 가능 최대진상무효전력은 식 (10)과는 다르며 다음과 같이 구한다. 그림 2와 같은 돌극기에서 내부유기 기전력은 다음 식 (11)로 주어진다.

$$\bar{E}_i = jX_d \bar{I}_d + jX_q \bar{I}_q + \bar{V} \quad (11)$$

단, $\bar{V} = V \angle 0^\circ$ (말단 전압)

$\bar{I} = I \angle -\phi$ (말단 전류)

$\bar{E}_i = E_i \angle \delta$ (내부 유기기전력)

$\bar{I}_d = I_d \angle \delta - 90^\circ$ (I 의 d축 성분)

$\bar{I}_q = I_q \angle \delta$ (I 의 q축 성분)

$$\bar{E}_i = j(X_d - X_q)\bar{I}_d + jX_q \bar{I} + \bar{V} = j(X_d - X_q)\bar{I}_d + \bar{E}_q \quad (12)$$

단, $\bar{E}_q = jX_q \bar{I} + \bar{V}$

$$\begin{aligned} j(X_d - X_q)\bar{I}_d &= (X_d - X_q)I_d \angle (90^\circ + \delta - 90^\circ) \\ &= (X_d - X_q)I_d \angle \delta \end{aligned} \quad (13)$$

식 (13)에서 $j(X_d - X_q)\bar{I}_d$ 가 q축 상에 있음을 알 수 있고, $E_i \angle \delta$ 이므로, \bar{E}_i 도 q축 상에 있다.

$$\begin{aligned} \bar{S} &= \bar{V} \bar{I}^* \\ &= \bar{V} [I_q \angle \delta - jI_d \angle \delta]^* = V \angle -\delta [I_q + jI_d] \\ &= (V \cos \delta - jV \sin \delta) \left(\frac{V \sin \delta}{X_q} + j \frac{E_f - V \cos \delta}{X_d} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

$$P = \frac{VE_f}{X_d} \sin \delta + \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta \quad (15)$$

$$Q = \frac{VE_f}{X_d} \cos \delta - V^2 \left(\frac{\cos^2 \delta}{X_d} + \frac{\sin^2 \delta}{X_q} \right) \quad (16)$$

식(15)와 (16)을 연립하여 풀면 식(17)과 같고, 최대 진상무효전력 공급 한계는 식(18)과 같다.

$$Q = \frac{1}{\tan \delta} P - \frac{V^2}{X_q} \quad (17)$$

$$Q_{max} = -\frac{V^2}{X_q} \quad (18)$$

4. 전체 흐름도

그림 3은 시송전 검토 프로그램의 전체 흐름도를 나타내고 있다. 시송전 가능 여부 조건으로 그림에서 보는 바와 같이 승압변압기, 송전선로 파라미터로부터 충전용량을 계산하고, 송전단 전압 및 자체기동 발전기 단자전압을 근거로 구한 발전기 무효전력 공급한계와 용량 비교 및 계산된 발전기 단자전압과 UVR의 설정 값을 비교한다. 이 두 개의 비교 조건을 모두 만족하면 시송전이 가능하고, 하나라도 불만족 시에는 시송전에 문제가 발생하게 된다.

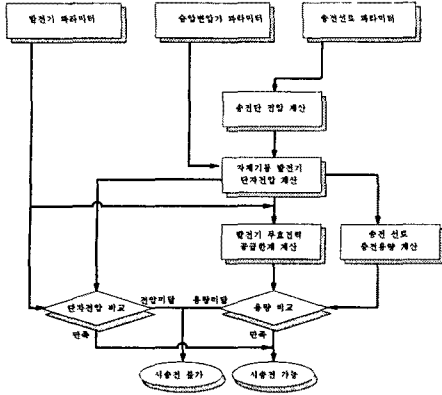


그림 3. 전체 흐름도

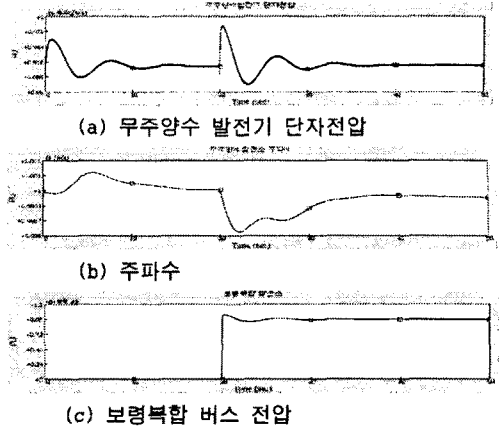


그림 5. 중부지역 주선로 EMTDC 모의 결과

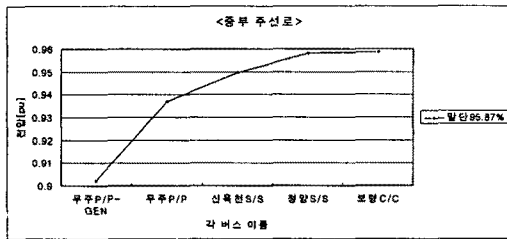


그림 4. 중부지역 주선로의 전압 프로파일

표 1. 중부지역 검토 결과

시송전 선로	수전단 전압 [kV] [%]	검토 결과				
		발전기 No	공급 Q [MVAR]	Q 여유 [MVAR]	델타각 [.]	발전기 전압
주선로	330.766 95.87	1	78.624	125.476	3.12	16.239[kV] 90.22[%]

5. 사례연구

국내 계통은 광역정전이나 전정전시 신속한 복구를 위해 병렬형 복구 방식을 채택하고 있으며, 이를 위해 7개의 분할 계통으로 구성되어 있다.

본 사례연구에서는 이러한 분할 계통 중 중부지역을 대상으로 하였다. 시송전선로의 전압 프로파일 및 충전용량과 자체기동 발전기의 무효전력 공급 한계를 정특성 해석하였으며, 차단기 스위칭 과도상태 전압을 고려하기 위해 EMTDC 모의를 병행하였다.

5.1 정특성 해석

EMTDC 모의로부터 과도상태를 고려하여 표 1에서 보는 바와 같이 수전단 전압을 설정 시, 각 자체기동발전기에서 시송전 선로로 공급하는 진상 무효전력과 그 여분, 발전기 내부 위상각 및 단자 전압을 알 수 있으며, 그림 4는 주선로의 전압 프로파일을 보여준다.

5.2 EMTDC 모의

시송전 선로 가압 시 차단기가 투입되면서 과도상태가 발생하는데, 이때 과도전압의 최대값이 운용한계치를 넘을 경우 절연파괴를 야기할 수 있다. 그러므로, 과도전압이 운용한계치를 넘지 않도록 자체기동발전기의 여자를 설정해야 한다. EMTDC 모의에 사용되는 파라미터는 PSS/E의 것을 사용하였으며, 그림 5는 그 결과이다.

5.3 전압 프로파일 비교

중부지역 주선로 버스 전압의 RMS 오차는 약 0.3[%]이며, 이는 정특성 해석 및 EMTDC 모의 결과가 거의 일치함을 의미한다.

6. 결 론

본 논문에서는 국내 계통망의 광역 또는 전역이 붕괴되었을 때, 계통 복구의 기본 골격이 되는 시송전 선로 검토 이론을 제시하였다. 7개의 분할 지역 중 중부지역의 시송전 계통을 사례연구하였으며, 시송전 검토 이론 및 프로그램을 통해 선로 충전용량과 자체기동 발전기의 무효전력 공급 한계의 비교, 그리고 시송전 선로의 전압 프로파일 및 적절한 발전기 출력전압에 대한 검토를 수행하였다. 추후 검토된 대상 계통 외의 시송전 계통에 대한 추가 검토가 필요하며, 제시한 시송전 검토 이론과 프로그램은 광역정전이나 전정전 발생시 복구의 기본 골격이 되는 시송전 계통의 검토 및 구성에 유용하게 이용될 것이다.

(참 고 문 헌)

- [1] M. Adibi, P. Clelland, L. Fink, H. Happ, R. Kafka, J. Raine, D. Scheurer, F. Trefny, "Power System Restoration - A Task Force Report" IEEE Trans. on PWRs, Vol. 2, No. 2, May 1987.
- [2] Gaston Morin, "Service Restoration Following A Major Failure On The Hydro-Quebec Power System" IEEE Trans. on PWRD, Vol. 2, No. 2, pp. 454-462, April 1987.
- [3] E. Mariani, F. Mastroianni, V. Romano, "Field Experiences In Reenergization Of Electrical Networks From Thermal And Hydro Units", IEEE Trans. on PAS, Vol. 103, No. 7, pp. 1707-1713, July 1984.
- [4] N. A. Fountas, N. D. Hatziaargyriou, C. Orfanogiannis, A. Tasoulis, "Interactive Long-Term Simulation For Power System Restoration Planning", IEEE Trans. on PWRs, Vol. 12, No. 1, pp. 61-68, February 1997.
- [5] Roger Kearsley, "Restoration In Sweden And Experience Gained From The Blackout Of 1983" IEEE Trans. on PWRs, Vol. 2, No. 2, pp. 422-428, May 1987.
- [6] Y. Hain, I. Schweitzer, "Analysis Of The Power Black-out Of June 8, 1995 In The Israel Electric Corporation", IEEE Trans. on PWRs, Vol. 12, No. 4, pp. 1752-1758, November 1997.