

시송전 계통에서 자기여자 현상의 새로운 해석 알고리즘 개발

論 文
54A-3-2

Development of New Algorithm for the Analysis of Self-Excitation in Primary Restorative Transmission Systems

李興載[†] · 朴誠民^{*} · 李垆燮^{**} · 裴周千^{**} · 黃奉桓^{**} · 宋寅俊^{***} · 李南鎬[§]
(H.J. Lee · S.M. Park · K.S. Lee · J.C. Bai · B.H. Hwang · I.J. Song · N.H. Lee)

Abstract - Power system restoration following a massive blackout starts with re-energizing primary transmission lines at first. Some factors such as Ferranti effect, and line charging reactive power should be considered in this stage. Severe overvoltage may be induced by the Ferranti effect at the lines since it would be usually no load condition. And lack of capacitive reactive power will cause the self-excitation. This paper presents a new precise algorithm to analyze the primary restorative transmission system focused on the two major static overvoltage problems during the early restoration process.

Key Words : Black-Start, Blackout, Reenergize, Self-Excitation, Ferranti Effect

1. 서 론

계통의 구조적인 측면에서 볼 때, 선진국의 계통은 우리나라보다 상대적으로 취약하므로 광역정전의 사례가 많이 발생하였으며, 특히 스웨덴과 같이 취약한 루프구조를 가진 나라에서는 빈번한 사고가 발생하였다. 따라서, 해외에서는 지난 20년간 신속하고 신뢰성 있는 복구를 위한 연구가 꾸준히 진행되어 왔으나, 우리나라에서는 광역정전 및 전정전에 관한 본격적인 연구가 최근에서야 수행된 바 있는데, 이는 우리나라의 계통이 해외의 선진국과 대비하여도 손색이 없는 설비를 갖추고 있고, 동적 안정도의 측면에서도 매우 안정적인 구조를 갖추고 있기 때문이다. 이와 같이 우리계통은 구조적 건실성으로 인해 광역정전이나 전정전이 발생할 확률은 적지만, 최대 부하 시의 계통 사고에 의한 발전과 부하의 불평형이 주파수 진동이나 전압 붕괴를 유발하여 차단기 연쇄 트립으로 파급될 개연성은 상존하고 있다.

전력계통의 복구 방식은 나라별로 사고 유형이나, 전압 레벨, 계통망의 구조 등에 따라 다르므로, 계통 복구 전략 또한 상이하다. 그러나, 광역정전의 경우 복구의 첫 단계에서 수력 발전기와 같이 신속하고 자체적으로 기동이 가능한 발전기(자체기동 발전기)로 송전 선로(시송전 선로)를 가압하여 대용량 발전기(우선공급 발전기)를 기동하는 방식은 전 세계적으로 대동소이하다[1-5].

정태특성의 측면에서 시송전 선로를 충전하는데 있어서

고려해야할 중요한 사항은 다음과 같다.

- 무부하 선로 가압에서 발생하는 시송전 선로의 과전압
- 시송전 선로의 충전용량

해외에서는 이러한 문제들을 해결하기 위해 시송전 선로로서 저전압 선로를 사용하고, 발전기를 최저 전압에서 기동하며, 필요시 SR(Shunt Reactor)를 투입하고 SSC (Switched Static Capacitor)를 제거하는 등의 정성적 방식을 사용해왔다[1-4].

본 논문에서는 현재까지 사용되고 있었던 발전기가 자기여자를 일으키지 않고 시송전이 가능한 조건식[6]을 분석하고, 선로와 변압기의 리액턴스 성분 및 변전소 부하 투입에 의한 지상 무효전력 보상 효과와 선로의 전압 프로파일을 고려한 시송전 선로의 충전용량을 계산하여 위의 조건식에 비해 개선된 정확한 자기여자 방지 판별식을 도출하였다.

2. 기존 자기여자 판별식 분석

최근까지 사용되고 있는 자체기동 발전기의 자기여자 판별식은 다음 식 (1)과 같았다.

$$K_S \geq \frac{Q'}{Q} \left(\frac{V}{V'} \right)^2 (1 + \delta) \quad (1)$$

여기서 K_S : 발전기 단락비

Q : 발전기 정격출력[MVA]

Q' : 충전전압 V' 에 대한 송전선의 3상 충전용량
= % Y_{PU} [MVA]

V : 발전기 정격전압[kV]

V' : 충전전압[kV]

δ : 정격전압에서의 포화계수(0.05~0.15)

[†] 교신저자, 正會員 : 光云大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
E-mail : hjlee@kw.ac.kr

^{*} 正會員 : 光云大 工大 電氣工學科 博士課程

^{**} 正會員 : 韓國電力去來所

^{***} 正會員 : 韓電 電力研究院

[§] 正會員 : LG산전 전력연구소

接受日字 : 2004年 12月 8日

最終完了 : 2005年 2月 15日

식 (1)은 자체기동 발전기의 무효전력 공급 가능량과 시송전 선로 충전용량의 관계를 이용한 것이지만 그 근거를 알 수 없으므로 본 연구에서는 우선 이 식을 유도하여 그 정확한 의미를 평가하고자 한다.

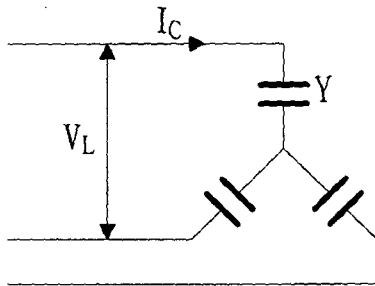


그림 1 충전용량을 고려한 시송전 선로 모형
Fig. 1 Primary restorative transmission line model considering line charging capacity

윗 그림 1에서 각 Y의 전류 및 충전용량은 다음 식 (2),(3)과 같고, 식 (4)에서 인가된 선간전압이 정격전압과 같다고 하면 3상 충전용량은 식 (5)와 같다. 즉, 1상당 어드미턴스의 PU값 변환시 선간전압과 3상 용량을 기준으로 잡으면 선로 충전용량은 1상당이 아닌 3상으로 계산된다.

$$I_C = j\omega C \frac{V_L}{\sqrt{3}} = j \frac{Y V_L}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

$$Q_{1\phi} = j \frac{V_L}{\sqrt{3}} I_C = j \frac{Y V_L^2}{3} \quad (3)$$

$$Q_{3\phi} = 3Q_{1\phi} = j Y V_L^2 = j Y_{base} Y_{PU} V_L^2 \quad (4)$$

$$Q_{3\phi} = Q' = j Y_{base} Y_{PU} V_{L_{base}}^2 = j Y_{base} Y_{PU} \frac{S_{3base}}{Y_{base}} = j \frac{\% Y_{PU}}{100} S_{3base} = j \% Y_{PU} \quad (5)$$

V' [kV]를 실제 인가전압이라 하면, 자체기동 발전기에서 공급할 수 있는 최대 진상무효전력과 선로 충전용량의 관계식은 식 (6)과 같다. S_{3base} 는 식 (1)의 Q와 같으므로, 발전기 동기 리액턴스는 식 (7),(8)과 같다. 발전기의 포화 계수를 δ 라 하면, 단락비와 동기 리액턴스의 관계는 식 (9),(10)과 같다.

$$\frac{V'^2}{X_d} \geq Q' \quad (6)$$

$$X_{dPU} = \frac{X_d}{Z_{base}} = \frac{X_d S_{3base}}{V_{L_{base}}^2} \quad (7)$$

$$X_{dPU} = \frac{X_d Q}{V_{L_{base}}^2} \quad (8)$$

$$K_s = \frac{1+\delta}{X_{dPU}} = \frac{V_{L_{base}}^2}{X_d Q} (1+\delta) \quad (9)$$

$$X_d = \frac{V_{L_{base}}^2}{K_s Q} (1+\delta) \quad (10)$$

$V_{L_{base}}$ 는 발전기 정격전압 (V)와 같으므로, 식 (10)을 식 (6)에 대입하면 식 (11)과 같이 나오며, 이를 정리하면 식 (1)과 같다.

$$\frac{V'^2 K_s Q}{V^2 (1+\delta)} \geq Q' \quad (11)$$

이상의 유도과정에서 살펴본 바와 같이 이 기준은 시송전 선로의 충전용량과 발전기의 진상무효전력 한계치를 비교하고자 하는 것으로 간단하고 실용적이나, 다음과 같은 약점을 갖는다.

- 각 버스의 전압을 1[PU]로 설정하였으므로, 페란티 효과로 인한 선로 충전용량의 오차를 고려하지 못한다.
- 일반적으로 발전기 데이터는 단락비보다 임피던스 형태로 주어지기 때문에 파라미터의 오차가 발생할 수 있다.
- 시송전 계통 내 부하투입이 지정된 경우, 이에 의한 진상무효전력 상쇄효과를 고려하지 못한다.
- 다구간 시송전 선로에 대해서는 적용하지 못하며, 일부 구간에서의 부하투입의 경우도 적용할 수 없다.

3. 개선된 시송전 선로 해석

본 논문에서는 페란티 효과의 영향을 줄이기 위한 변전소에서의 부하 투입과 자체기동 발전기의 UVR 설정치의 고려 및 다구간 시송전 계통의 해석을 정밀하게 해석할 수 있는 새로운 알고리즘을 제시하였으며, 이를 이용하여 자체기동 발전기의 자기여자 현상과 관련된 선로 충전용량과 발전소의 무효전력 공급 한계 비교를 정밀하게 해석할 수 있다.

3.1 변전소 부하 투입

그림 2는 2대의 자체기동발전기와 승압변압기, 다수의 구간으로 구성된 시송전 계통도이며, 그림에서 보듯이 각 버스에서의 부하 투입을 임의로 지정할 수 있고, 발전기 소내 부하는 승압변압기 2차측, 즉 전압 V_1 으로 표시된 버스

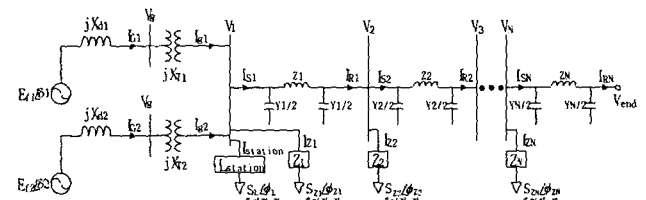


그림 2 정특성 해석을 위한 계통도
Fig. 2 Single line diagram for static analysis

로부터 공급된다. 우선공급발전소가 위치한 시송전 선로의 말단전압 V_{end} 를 결정하면, 시송전 조건에서 $I_{RN}=0$ 이므로, 식 (12)의 계산을 반복하여 각 버스의 전압을 구할 수

있다. 선로는 Π 등가 모형을 사용하였고, 전압과 전류 및 임피던스는 그림에 표시된 바와 같으며, $L_{station}$ 은 발전소의 소내부하(통상 발전기 정출력의 5[%] 정도)를, V_g 는 발전기의 단자전압을 나타낸다.

투입된 부하는 V_N 버스의 정격전압과 투입된 부하용량 $S_{ZN} < \phi_{ZN}$ 에 의해 식 (13)에서 구해지는 고정부하와 이 부하가 연결된 버스에 인가된 전압과의 관계식으로부터 전류로 표현하며, 식 (14)와 같다. V_N 이 인가된 버스로 흘러 들어가는 전류는 $I_{SN} + I_{ZN}$ 이고, 위의 (12)~(14)를 반복 계산하여 $V_1, I_1, I_{station}$ 까지 구한다.

$$\begin{bmatrix} V_N \\ I_{SN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z_N \cdot Y_N}{2} & Z_N \\ Y_N \left(1 + \frac{Z_N \cdot Y_N}{4}\right) & 1 + \frac{Z_N \cdot Y_N}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{end} \\ I_{RN} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$Z_N = \left(\frac{|V_{rated}|^2}{S_{ZN} \cos \phi_{ZN}} \right)^* \quad (13)$$

$$I_{ZN} = \frac{V_N}{Z_N} \quad (14)$$

3.2 발전단 전압

한전계통은 전정전 또는 광역정전 발생 후 시송전을 수행하기 위하여 황색차단기를 제외한 모든 차단기를 개방시키고, 모든 부하를 차단시키는 전략을 채용하고 있는데, 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 발전기 등 설비의 절연내력 문제와 직결되므로 선로의 모든 구간에 인가되는 전압을 운용한계치 내로 유지할 수 있는 발전단 전압을 구해야 하며, 이는 시송전 선로 각 구간에 대한 4단계회로 계산을 통해 다음과 같이 구할 수 있다.

그림 2에서 식 (12)를 통해 송전단 전압(V_1)을 구했으며, 발전기 단자전압(V_g)은 승압변압기(jX_{T1}), V_1 과 I_{g1} 의 관계식으로부터 다음 식 (18)과 같이 구한다. 단, 승압변압기의 변압비는 별도로 고려해준다.

$$I_{g1} + I_{g2} = I_s \quad (15)$$

$$I_{g1} = \frac{V_g - V_1}{jX_{T1}}, \quad I_{g2} = \frac{V_g - V_1}{jX_{T2}} \quad (16)$$

$$I_{g1} + I_{g2} = \frac{V_g - V_1}{jX_{T1}} + \frac{V_g - V_1}{jX_{T2}} = I_s \quad (17)$$

$$V_g = V_1 + I_s \left(\frac{jX_{T1} \cdot jX_{T2}}{jX_{T1} + jX_{T2}} \right) \quad (18)$$

3.3 선로 충전용량

시송전 선로의 충전용량은 선로 어드미턴스와 이에 인가되는 전압과의 관계에서 구할 수도 있지만, 이는 선로와 변

압기의 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 (18)에서 구한 발전기 단자전압을 식 (16)에 대입하면, 각 자체기동발전기에서 나오는 전류 I_{g1} 를 구할 수 있고, 승압변압기의 변류비를 고려하여 I_{G1} 를 구한다. V_g 와 I_{G1} 로부터 각 발전기에서 공급하는 진상 무효전력을 구할 수 있다.

4. 전체 흐름도

그림 3은 시송전 검토 프로그램의 전체 흐름도를 나타내고 있다. 시송전 가능 여부 조건으로 그림에서 보는 바와 같이 송전선로, 승압변압기, 발전기 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 만족할 경우에만 시송전 작업이 안전하게 수행될 수 있다.

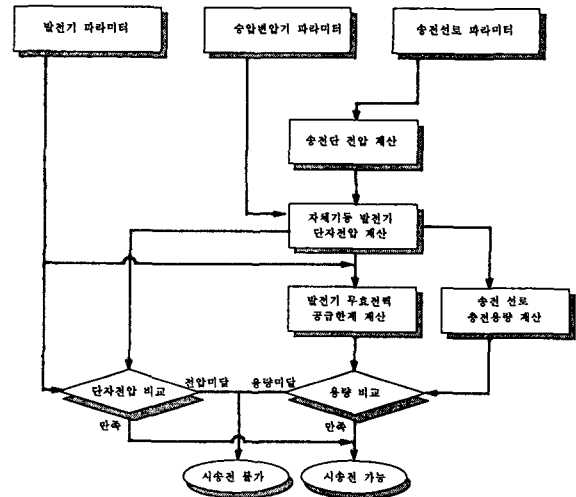


그림 3 전체 흐름도

Fig. 3 Flow chart of the entire process

5. 사례연구

광역정전이나 전정전이 발생했을 경우, 병렬형 복구 방식이 신속한 복구를 위해 적합하며, 국내 계통 또한 이를 위해 7개의 분할 계통으로 구성되어 있다. 그림 4는 중부지역의 시송전 계통도이며, 본 사례연구에서는 중부지역 주선로를 대상으로 하여 전압 프로파일 및 충전용량과 변전소 부하투입 효과 등에 대해 정특성 해석을 수행하였다.

전압 프로파일을 구하는데 있어, 수전단 전압을 미리 설정해줄 수 있는데, 이는 페란티 효과를 고려하여 수전단 전압을 적정하게 설정해 줌으로써 시송전 선로에 과전압이 발생하지 않도록 해주기 위함이다. 표 1에서 보는 바와 같이 정특성 해석을 통해 각 자체기동발전기에서 시송전 선로로

저 자 소 개



이 흥 재(李興載)

1958년 1월 28일 생. 1983년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1995년~1996년 미국 워싱턴 주립대 방문교수.

현재 광운대 전기공학과 교수

Tel : 02-940-5147

E-mail : hjlee@kw.ac.kr



황 봉 환(黃奉桓)

1966년 11월 28일 생. 1994년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 2004년 미국 유니온 대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전력거래소 계통 운영처 과장

Tel : 02-3456-6763

E-mail : bhhwang@kpx.or.kr



박 성 민(朴誠民)

1976년 2월 13일 생. 1999년 광운대 공대 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 02-940-5147

E-mail : smpark@explore.kw.ac.kr



송 인 준(宋寅俊)

1961년 2월 7일 생. 1982년 전북대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 동 대학원 전자계산기공학과(공박). 현재 한전 전력연구원 선임연구원

Tel : 042-865-5832

E-mail : injun@kepco.co.kr



이 경 섭(李垆燮)

1974년 7월 5일 생. 1998년 광운대 공대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 02-940-5147

E-mail : kyeong@explore.kw.ac.kr



이 남 호(李南鎬)

1973년 7월 26일 생. 1998년 명지대 공대 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년~2004년 한전 전력연구원 위촉연구원. 현재 LG산전 전력연구소 주임연구원

Tel : 043-272-6553

E-mail : nam100@lgis.com



배 주 천(裴周千)

1958년 11월 23일 생. 1981년 광운대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 한국전력거래소 계통계획팀장

Tel : 02-3456-6720

E-mail : jcbae@kpx.or.kr