

대정전 계통 복구를 위한 시송전 선로에 관한 연구

이홍재\* · 김근도\* · 박성민\* · 배주천\*\* · 황봉환\*\* · 홍순천\*\*\* · 김기동\*\*\* · 이남호\*\*\*  
 광운대학교 전기공학과\* · 전력거래소\*\* · 전력연구원\*\*\*

A Study on transmission lines energized initially to restore wide black out power system

H.J. Lee\* · G.D. Kim\* · S.M. Park\* · J.C. Bae\*\* · B.H. Hwang\*\* · S.C. Hong\*\*\* · K.D. Kim\*\*\* · N.H. Lee\*\*\*  
 KwangWoon University\* · Korea Power Exchange\*\* · Korea Electric Power Research Institute\*\*\*

**Abstract** - When a wide area blackout occurs, reenergizing transmission lines should be done at first. The KEPCO(Korea Electric Power Corporation) divides whole power system grid into seven subsystem, and each subsystem has one or two blackstart power plants which are usually hydro or combined-combustion type, one priority power plant which should be first supplied with electric energy, and transmission lines between them. Voltage rising, line charging, and operation stability problem should be considered when these lines are reenergized. In this paper, building-up process for primary transmission system that should be energized at first is analyzed.

1. 서 론

현대의 전력계통은 점차 대규모화 양상을 띄고 있으며, 많은 보조 설비를 추가하여 계통의 안정적 운영 및 신뢰도 향상을 꾀하고 있다. 이러한 발전된 설비 및 계통운용으로 과거에 비해 정전 및 플리커 현상이 많이 개선되었고, 주파수, 전압 제어 및 계통 운용이 향상되었다. 그러나, 최대 부하 시의 계통 사고가 발전과 부하의 불평형을 유발하여 차단기 연쇄 트립으로 과급될 수 있으며, 이로 인해 국내 전 지역에 걸친 대정전이 발생할 수 있다. 전력 계통은 사회 기간 산업이기 때문에 이러한 광역정전 발생 시 막대한 경제적 손실을 입을 수 있으므로, 신속한 계통 복구가 실행되어야 한다.

이러한 상황에서의 복구 과정은 중앙집중형의 하향식과 분산형의 상향식이 있다. 중앙집중형 방식은 복구 시간이 많이 소요되어 정전시간과 경제적 손실이 비례하는 이러한 상황에서는 적합하지 않은 방식이므로, 일반적으로 분산형 방식을 취한다. 이 방식은 전 계통을 여러 계통으로 분할하여 각 계통을 복구하고, 연계 선로를 통해 순차적으로 동기화 시키는 방식이다[1]. 각 분할 계통은 하나 이상의 자체 기동 발전소를 갖고 있어야 하며, 이러한 발전소는 정전 후 외부 전원이 없는 상태에서 자체적으로 기동할 수 있는 것으로, 소용량의 수력이나 복합 발전소로 구성된다. 이러한 자체 기동 발전소로부터 연결된 시송전선로를 가압하여, 대용량의 가스 터빈 발전소나 복합 발전소, 원자력 발전소와 같은 정전 시 외부 전원이 있어야 재기동이 가능한 우선 공급 발전소에 전력을 공급하고, 이러한 발전소가 정상화 된 후 부하 및 타 발전소에 전력을 공급하여 각 분할 계통을 복구한다.

분할 계통을 복구하는데 있어, 다음과 같이 고려해야 할 몇 가지 문제점들이 있다. 시송전은 무부하시의 송전선로를 가압하는 것이므로, 페란티 효과에 의한 전압 상승, 선로와 대지간의 캐패시턴스 성분에 의한 선로 충전용량과 자체 기동 발전소에서 공급할 수 있는 무효전력량 한계와의 비교, 운용에 있어 발전기 안정도 등이 고

려되어야 한다.

본 논문에서는 제시된 문제점들을 고려한 시송전 검토 이론 및 프로그램을 기반으로 시송전 계통 복구에 관한 연구를 수행하였다.

2. 전압 상승률 검토

대정전 발생 후 계통 구조를 단순화하기 위해서는 모든 차단기를 개방시키는 전략을 사용하고, 모든 부하는 차단되어 있는 상태이다[2]. 무부하 상태에서 송전선로를 가압하게 되면, 선로 말단에 과전압을 야기할 수 있으므로 전압 상승률에 대한 검토가 필요하다[3].

2.1 4단자 회로

시송전 선로의 각 구간은 다음과 같이 4단자 회로로 표현할 수 있다.

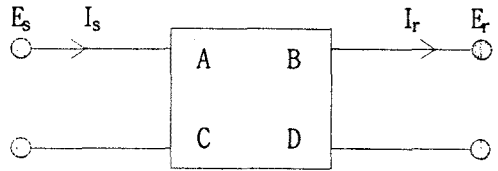


그림 1. 4단자 회로

$$\begin{bmatrix} E_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_r \\ I_r \end{bmatrix}$$

시송전에서는 수신측 전류가 0이므로,

$$E_s = A \cdot E_r, I_s = C \cdot E_r$$

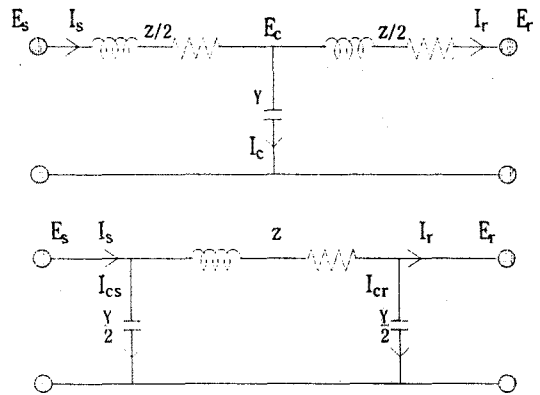


그림 2. T형(상)과 pi형(하) 등가회로

표 1. 4단자 정수

	A	B	C	D
승압 Tr.	1	Z	0	1
T형	$1 + \frac{ZY}{2}$	$Z(1 + \frac{ZY}{4})$	Y	$1 + \frac{ZY}{2}$
$\pi$ 형	$1 + \frac{ZY}{2}$	Z	$Y(1 + \frac{ZY}{4})$	$1 + \frac{ZY}{2}$

승압 변압기 및 송전 선로 각 구간의 T형과  $\pi$ 형 등 가회로의 4단자 정수는 위의 표 1과 같다.

2.2 전압 상승률

2.1.1 단구간 선로의 전압 상승률

무부하 송전 선로의 가압에서 수전측 전압이 송전측 전압보다 높으므로 다음과 같이 전압 상승률을 구한다.

$$\frac{E_r - E_s}{E_s} \times 100 = \frac{E_r - A \cdot E_r}{A \cdot E_r} \times 100 = \left(\frac{1}{A} - 1\right) \times 100$$

$$= \left(\frac{1}{1 + \frac{ZY}{2}} - 1\right) \times 100 = \frac{-ZY}{2 + ZY} \times 100 \quad (1)$$

단,  $E_r$  : 수전측 전압  $E_s$  : 송전측 전압  
 $Z$  : 선로 임피던스  $Y$  : 선로 서셉턴스  
 $A$  : 4단자 정수

$$Z_{pu} = \frac{Z_{actual}}{Z_{base}}, Z_{base} = \frac{1}{Y_{base}}$$

$$Z_{pu} \cdot Y_{pu} = \frac{Z_{actual}}{Z_{base}} \cdot \frac{Y_{actual}}{Y_{base}} = Z_{actual} \cdot Y_{actual} \quad (2)$$

즉, 식(2)는 단구간 선로의 전압 상승률이 단위(pu) 값이나 실제(actual)값에 상관없이 일정하다는 것을 의미한다.

2.1.2 다구간 선로의 전압 상승률

아래의 그림 3에서 보는 바와 같이 변압기 측은 발전단에 붙어 있는 승압 변압기를 2차측으로 등가한 것이며, 등가저항은 등가인덕턴스에 비해 무시할 수 있을 정도로 작다. 표 1의 4단자 정수를 참고하면, 각 구간을 고려한 시송전 선로 전체의 4단자 행렬은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} A_{total} & B_{total} \\ C_{total} & D_{total} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (3)$$

$A_{total}$ 을 고려하여, 전압 상승률을 구하면,

$$\frac{E_r - E_s}{E_s} \times 100 = \left(\frac{1}{A_{total}} - 1\right) \times 100 \quad (4)$$

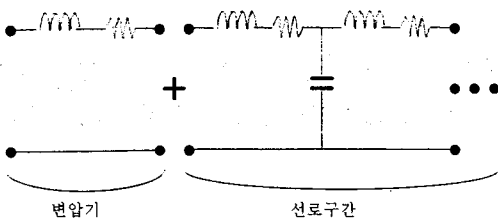


그림 3. 다구간 선로 모형

3. 선로 충전용량

그림 2의 T형 등가 회로에서 전압의 증가 추이는  $E_s < E_c < E_r$  과 같지만, 여유를 두어 충전용량을 계산하면 수전측 전압을 기준으로 한다. 한전에서 임피던스와 서셉턴스의 자료는 선간전압( $E_r$ )과 3상용량(100MVA)을 기준으로 하므로 다음과 같이 충전전류와 충전용량을 구한다. 단,  $Y$ 와  $E_r$ 은 PU 값이다.

$$I_s = Y \cdot E_r, S_{3\phi} = 100 \times Y \cdot E_r^2 \quad (5)$$

4. 발전기 무효전력 공급

발전기의 정상상태 등가회로에서

$X_d$  : 동기임피던스

$E_f < \delta$  : 발전기 내부유기 기전력

$V < 0$  : 발전기 단자 전압 이라고 하면,

발전기의 출력 전력은 다음과 같이 구해진다.

$$S = P + jQ = VI^* = V \left[ \frac{E_f - V}{jX_d} \right]^*$$

$$= \frac{VE_f}{X_d} \sin \delta + j \left[ \frac{VE_f}{X_d} \cos \delta - \frac{V^2}{X_d} \right] \quad (6)$$

$P = \frac{VE_f}{X_d} \sin \delta$  이므로,  $\delta = 90^\circ$  일 때, 최대유효전력

및 최대진상무효전력을 출력할 수 있지만, 실제로는 5% 정도의 소내 전력이 필요하고, 외란에 의한 동기탈조를 방지하기 위한 여유를 두는 것이 반드시 필요하다. 따라서  $\sin \delta = 0.9$  정도를 두는 것이 바람직하다.

식(6)의 P, Q를 연립하여 풀면 무효전력 발전량 한계는 다음과 같이 구해진다.

$$Q = \frac{1}{\tan \delta_{max}} P - \frac{V^2}{X_d} \quad (7)$$

5. 전체 흐름도

다음의 그림은 전체 흐름도를 나타내고 있다. 시송전 가능 여부 조건으로 그림에서 보는 바와 같이 선로 전압 상승률, 송전 선로 충전용량과 발전기 무효전력 공급 가능량 비교, 발전기 안정도 여유 계산, 검토 대상 선로가 이 3가지 조건 중 하나라도 만족하지 못할 시에는 시송전 선로로서 부적합하다.

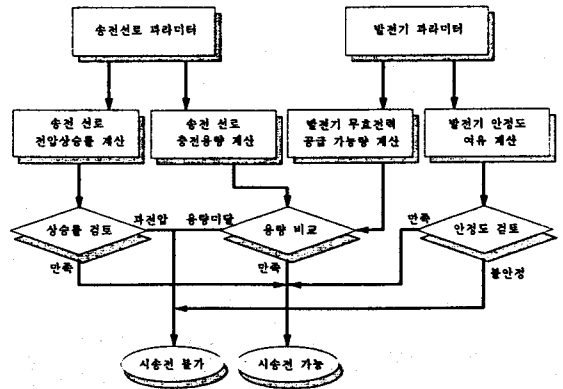


그림 4. 전체 흐름도

6. 사례 연구

국내는 전 계통이 경인남·북부, 중부, 영남·동부,

호남, 제주 지역으로 분할되어 있으며, 각 지역의 시송전 계통을 기초로 하여 분산형 방식을 통해 복구된다. 다음의 사례는 호남지역 시송전 계통의 검토 내용이다. 본 계통은 섬진강 수력 발전소를 자체 기동 발전소로 하여 우선 공급 발전소인 여수 화력 발전소에 시송전 선로를 통해 전력을 공급하는 형태이다. 대상계통의 데이터는 다음과 같다.

- 송전선로 파라미터
  - : 그림 5에서 임피던스와 서셉턴스는 %값. 기준 전압 (154kV), 기준 용량 (100MVA)
  - : 승압 변압기 (10.5:154kV, 11%, 35MVA)
- 발전기 파라미터
  - : 1대, 1.0[pu], 0.9, 32[MVA], 11[kV], 5[%]

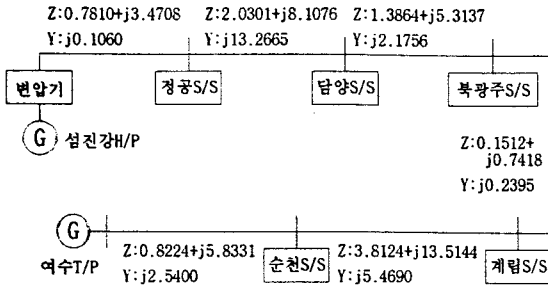


그림 5. 호남지역 시송전 계통

- 변압기 임피던스
 
$$= \frac{\%Z \times \text{전압}^2}{100 \times \text{정격용량}} = \frac{11 \times 154^2}{100 \times 35} = 74.536 [\Omega]$$
- 시송전 선로 4단자망
  - : 선로 각 구간 임피던스와 서셉턴스의 실제 값을 구한 후 표 1과 식(3)을 참고하여 최종 4단자망을 구하면  $A=0.968$  이므로 전압상승률은 3.304%
- 선로 말단전압과 상승률, 변압비를 고려하여, 발전기 출력전압을 결정하면, 10.164[kV]이다.
- 발전단의 정격 대비 단자전압은 92.4%이다.
- 식(7)에서 소내 소비 전력을 무시하면, 발전소에서 출력 가능한 무효전력량은 다음과 같다.
 
$$Q = \frac{V_L^2}{X_d} = \frac{10.164^2}{3.78125} = 27.321 [MVAR]$$
- 시송전 선로의 충전용량은 다음과 같이 구한다.
  - $Y$ 총합 = 23.7966이므로, 식(5)를 근거로 선로 충전 용량  $Q_H = 100 \times 0.237966 \times 1.0^2 = 23.7966 [MVAR]$
  - (단, 위의  $Q_H$ 는 버스별 전압 추이를 무시한, 말단 전압을 기준으로 구한 값임)
- 안정도 여유는 다음과 같이 구한다.
  - : 시송전 선로 충전용량 (23.7966[MVAR])
  - : 소내 소비 전력 (5%)
  - : 발전단 정격 대비 단자전압 (92.4%)
  - : 발전소 정격 출력 (32[MVA])
$$\left\{ \frac{0.05}{\tan \delta} - \frac{\left( \frac{100-7.6}{100} \right)^2}{1} \right\} \times 32 = -23.7966$$

$\tan \delta = 0.454, \sin \delta = 0.4134$  이므로,  
안정도 여유는  $\frac{1-0.4134}{1} \times 100 = 58.66\%$  이다.

다음은 T 및  $\pi$  형 등가회로를 사용한 경우의 각 지점에서의 전압분포를 표시한 것이다.

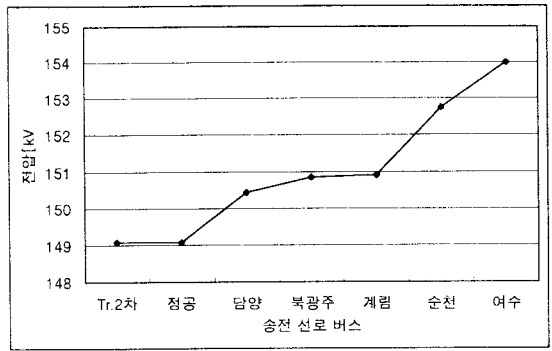


그림 6. T형 등가 선로의 전압 추이

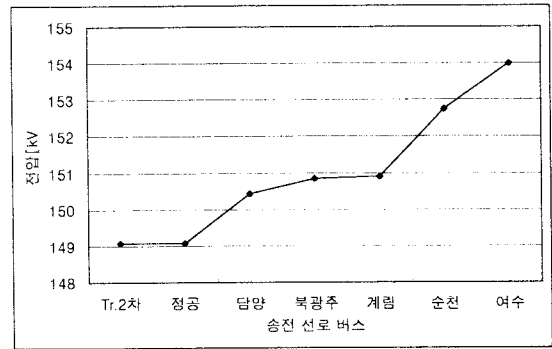


그림 7.  $\pi$ 형 등가 선로의 전압 추이

그림에서 보는 바와 같이 각 등가회로의 전압 상승 추이가 흡사함을 알 수 있으며, 두 등가회로 모두 시송전 선로 충전용량이 비슷한 값으로 나온다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 국내 계통망의 전역이 붕괴되었을 때, 복구의 기본 골격이 되는 시송전 선로 검토 이론을 제시하였다. 호남 지역의 시송전 계통을 사례로 연구하였으며, 시송전 검토 이론 및 프로그램을 통해 선로 충전 용량과 발전기 무효전력 생산 가능량의 비교, 그리고 시송전 선로의 전압 상승 추이에 대한 검토를 수행하였다. 추후 호남 지역 외의 6개 시송전 계통에 대한 검토가 필요하며, 제시한 시송전 선로 검토 이론과 프로그램은 전역 정전시 복구의 근간이 되는 시송전 계통의 검토 및 구성에 유용하게 이용될 것이다.

### [참고 문헌]

- (1) E. Mariani, F. Mastroianni, V. Romano, "Field Experiences In Reenergization Of Electrical Network From Thermal And Hydro Units", IEEE Trans. on PAS, Vol. 103, No. 7, pp. 1707-1713, Jul. 1984.
- (2) Edward J. Simburger, Francis J. Hubert, "Low Voltage Bulk Power System Restoration Simulation", IEEE Trans. on PAS, Vol. 100, No. 11, pp. 4479-4484, Nov. 1981.
- (3) M.M. Adibi, R.W. Alexander, B. Avramovic, "Over-voltage Control During Restoration", IEEE Trans. on PWRs, Vol. 7, No. 4, pp. 1464-1470, Nov. 1992.