전철 지중배전선로의 충전전류보상에 관한 연구

A Study of the Charging Current Effect on Underground Distribution Line in Electric Railway

김양수* 장우진**

Kim, Yangsu **Jang, Woojin**

ABSTRACT

Because on the high-tension underground distribution line of an electric railway high voltage XLPE Cable two or three circuits between railway stations with a standard as receiving transformer facilities are established at a 30km~50km interval, reactive power in which the phase of a current is larger than that of a voltage is supplied when trains are not working, so when there are no loading or low loading as night. Due to the long-distance trend of the underground distribution system on an alternating current railway distribution line, the terminal voltage of a transformer is over the standard voltage, and after all, commercial cycle overvoltage is continued.

To solve this problem, the shunt reactor is installed in middle of power distribution lines to maintain receiver voltage meted under the allowance regulation through control of the reactive power. Also, in case that the thickness of single cable is over 60mm^2 and length of line is about over 30km, a circuit breaker is broken by shorting shunt ability of charging current in excess of shunt current(31.5A.rms).

Therefore, this thesis presents installing the location of shunt reactor for quantitative analysis by using optimum algorism for compensation and control of the charging current.

1. 서 론

교류전기철도의 수변전설비는 역 사이에 고압XLPE Cable 2～3회선을 30～50km 간격으로 배전선로를 지중 관로에 시설하므로 열차운행이 거의 없는 야간 등의 무부하시 또는 경부하시에는 전류가 전압보다 위상이 앞선 진상성분 무효전력을 배전선로에 공급시키는 현상을 발생하며 선로거리가 증가할수록 대지정전용량이 상승하여 수전측 전압을 상승시킴으로써 직렬 전기기기의 절연내력저하, 수명단축 및 화재 등을 일으킬 수 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 배전선로의 중간에 분로리액터를 설치하여 진상분 무효전력 및 지상분 무효전력의 적정한 제어를 통하여 수전측 전압을 허용규정에 적합하도록 유지시켜야 한다. 또한, 단심케이블의 굵기 60mm^{2}이상이고 선로길이가 대략 30km를 초과시에는 정격케이블 충전차단 전류치(31.5A.rms)를 초과하여 차단기의 충전전류 차단능력 부족으로 차단시 트립 실패에 따른 차단기의 고장원인이 될 수 있다.

그러므로 충전전류의 보상과 제어를 위해 최적의 알고리즘을 사용하여 분로리액터의 설치 위치를 정량화하기 위한 연구이다.

* 서울산업대학교 철도전문대학원 철도전기신호공학과 석사과정, 회원
E-mail : osa54epe@naver.com
TEL : (031)995-7805 FAX : (02)978-6874
** 서울산업대학교 전기공학과 교수, 회원

2. 고압배전선로

2.1 22.9kV CNCV-W 케이블

국내 최초 고속전철(KTX)의 전력배전선로는 비접지방식인 22kV XLPE 케이블 2회선을 지중관로에 포설하여 사용되고 있으며, 도시철도를 제외한 일반 국유철도에서는 고압 배전선로로서 1회선은 지중에 포설(6.6kV XLPE)하고, 다른 1회선은 가공으로 시공(6.6kV ACSR)하여 운용되어 왔으나 최근 경부선(대전-동대구)에 배전전압 6.6kV를 22.9kV로 승압시켜 사용중이며, 이어서 경의선, 경전선등의 배전선로는 22.9kV 시공중에 있으며, 기존 6.6kV 배전선로는 앞으로 22.9kV 계통으로 변경 및 보완 될 것으로 예상되고 있다.

2.2 고압배전선로의 계통구성

배전선로의 전원공급은 2회선(No.1, No.2) 배전선로를 구성하며 정상시 실선방향으로 전원을 공급하고 중간 수전설비 사고 또는 상시 배전선로의 정전시에는 예비용 배전선로(No.2)를 이용한 연장급전이 가능하도록 회로를 다음 그림 1과 같이 구성하고 있다.

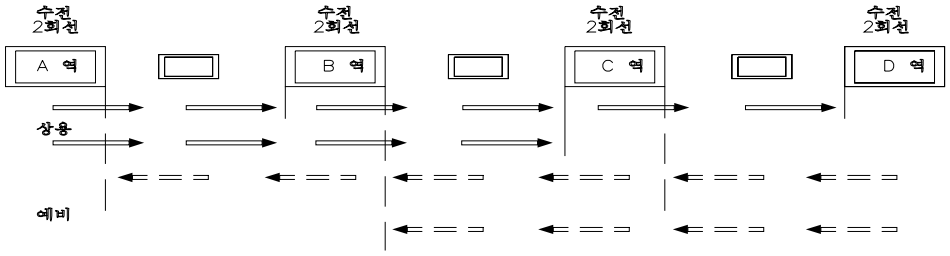

그림 1. 철도배전선로의 계통구성

2.3 단심케이블의 전압상승

일반철도 지중배전선로는 전력회사의 배전선로보다 긍장(亘長)이 매우 길어서 22.9 kV 배전선로의 경우에 케이블의 무부하 충전전류로 인하여 전원측 주변압기의 단자전압상승에 의한 전기기기의 열화, 수명단축 및 화재 원인 등의 영향을 일으킬 수 있다. 또한, 단심케이블의 금속차폐층에 정격전압보다 높은 전압이 유기되어 인체 등의 접촉시 감전쇼크 등을 일으킬 수도 있다.

2.4 단심케이블 차폐층(Sheath Layer) 유기전압

차폐층 전압의 허용치는 국가별로 값을 상이하게 적용하고 있으며, 영국은 65V, 미국은 65~90V, 일본은 50V 초과시, 우리나라는 한국전력공사 설계기준에서 차폐층 상시최대유기전압 100V 이하로 정하고 있다. 계산방법은 ANSI 757-1988 Appendix D에 D2.2 Trefoil formation Single circuit와 D2.3 Flat formation Single circuit의 계산방법, 전력케이블기술 Hand Book(전기서원-일본 1994년판) 및 Underground transmission system reference Book(1992 EPRI) 에 각각 유사한 계산방법이 제시 되어 있으며, 정삼각배열 1회선 케이블간의 간격이 없을 때 차폐층 전압계산은 다음 식(1)과 같다[1].

$$E_A = j\omega I_B (2\times 10^{-7})\times\left(-\frac{1}{2}+j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\times \ln\left(\frac{2S}{d}\right)[\mathrm{V/m}] \qquad (1)$$

3. 배전선로의 케이블 충전전류와 충전용량

3.1 케이블 충전전류

배전선로의 케이블 충전전류는 선의 종류, 굵기에 따라 다르지만 개략의 값은 교류 3kV 계통에서는 0.6~1.5A/km, 교류 6kV 계통에서는 0.9~2.0 A/km, 교류 22.9kV 계통에서는 1.05~1.25 A/km 정도이다. 전력케이블의 삼심 일괄 대지충전전류 I_{chg}는 다음 식(2)와 같다[2].

$$I_{chg} = (B_c - B_L)\times|V| = B_c\times|V|\times\left(1-\frac{B_L}{B_c}\right) = 2\pi f\, C_0\, \frac{E}{\sqrt{3}}\times 10^{-6}[\mathrm{A/km}] \qquad (2)$$

여기서, Bc ; 선로의 전체 Capacitive Susceptance

B_L ; 선로의 전체 Inductive Susceptance

V : 대지간 정격전압 [V]

Bc $-B_L$: 수전단에서 무부하전압상승의 한계값을 결정하는 Shunt Susceptance

$\frac{B_L}{B_c}$: Shunt Compensation Factor(S.C.F.)

C_0 : 삼심 일괄 대지정전용량 (=3C) [㎌/km]

E : 선간전압[V]

C : 단심 대지정전용량 [㎌/km]

C : $\frac{0.02413 \times \varepsilon}{\log_{10}\frac{D}{d}}$ [㎌/km]

ε : 유전율 (XLPE=2.3)

d : 도체 외경[mm]

D : 차폐층의 내경[mm]

3.2 분로리액터에 의한 충전전류의 보상

배전선로에 커패시턴스를 갖고 있는 경우 경부하시에 충전전류의 영향으로 철도 배전선로의 수전설비 및 전기실에서 심야에 지상전류를 공급하여 변압기 모선전압의 상승을 억제하기 위하여 그림 2와 같이 분로리액터를 설치한다.

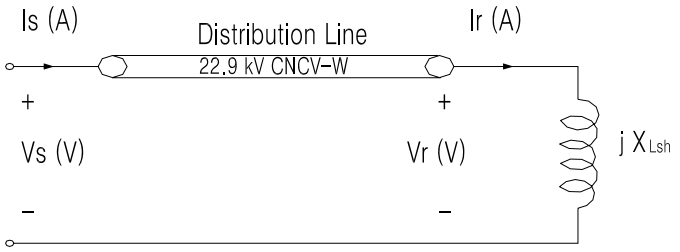

그림 2. 분로리액터 보상

분로리액터의 요구하는 용량 X_{Lsh}은 다음 식(3)과 같다[3].

$$X_{Lsh} = \frac{\sin\beta\ell}{\frac{V_S}{V_R} - \cos\beta\ell} \times Z_C \ [\Omega] \tag{3}$$

여기서, β : 전파상수(=$j\omega\sqrt{LC}[rad]$)

ℓ : 선로거리[km]

V_R : 수전단 전압[kV]

V_S : 송전단 전압[kV]

Z_C : 파동 임피던스[Ω]

4. 분로리액터의 설치방법 개선

4.1 가변형 분로리액터 설치

분로리액터는 선로 커패시턴스에 의해 요구하지 않은 전압의 영향을 보상하는데 적용하는 장치이고 배전선로의 수전단 전압을 리액터로 보상하여 요구하는 전압을 얻기 위하여 사용한다. 지중 고압케이블의 충전전류의 보상 및 변압기(22.9kV/ 22.9kV) 2차측 단자전압을 경감시키기 위하여 당초에는 고정식 분로리액터(shunt reactor)를 설치하였으나 수전단 역률(요금가산 기준역률 90%) 이 50~60 % 수준으로 저하되어 기준치 이하의 역률에 의한 전기요금 증가로 경제적 부담이 가중되므로 그림 3 및 그림 4와 같은 설계에 의한 개선방법이 필요하였다.

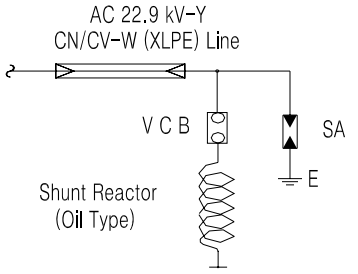

그림 3 고정형 분로리액터

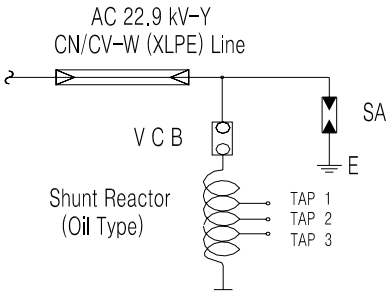

그림 4 가변형(탭부착) 분로리액터

그림 3과 같이 일정한 규격의 고정된 정격용량의 분로리액터는 지상분 무효전력을 부하증감에 관계없이 균일하게 공급하여 계통운영시 유연성이 거의 없었으나 그림 4의 가변형 분로 리액터는 중간에 TAP을 인출하여 부하량에 대응하여 TAP을 가변시키므로서 역율을 기준치 이상으로 유지하면서 충전전류값도 정격케이블 충전전류 이하(31.5 A rms)로 조정하여 배전선로의 효율 향상과 경제적으로 운용할 수 있도록 하였으며 분로리액터의 용량은 Q = $\sqrt{3} \times V \times I_{chg}$ [kVA]이다.

4.2 정격 케이블 충전차단전류

정격 케이블 충전차단전류는 사용하고 있는 정격전압 하에서 회로를 차단기가 차단할 수 있는 최대 충전전류의 값으로 표 1과 같이 IEC 62271-100(p.97)에서 기준값으로 정하고 있다.

표 1. 정격 용량성 개폐전류의 기준값

구 분	선 로	케 이 블	콘 덴 서 뱅 크
정격전압 (kVrms)	정격 선로 충전차단전류 (Arms)	정격 케이블 충전차단전류 (Arms)	정격 콘덴서 충전차단전류 (Arms)
7.2	10	10	400
24	10	31.5	400
25.8	10	31.5	400
72.5	10	125	400

4.3 시뮬레이션

일반적으로 중부하시의 배전선로 상태에서는 Shunt capacitor, 진상capacitor의 제어 및 동기 capacitor를 사용하여 기준전압 및 전력을 개선하여 계통 안정을 이룰 수 있으며, 경부하 또는 부하를 거의 사용하지 않는 부하 개방이나 다름이 없는 무부하시에는 수전단전압이 송전단전압보다 높아져서 페란티 효과가 나타난다. 따라서 역사에서의 업무용 부하전력 사용량 증가시에는 분로리액터의 용량을 단계적으로 저감하여 충전전류를 보상하고 부하전력 사용량이 적은 경부하 또는 무부하시에는 충전전류가 경감되도록 분로리액터의 탭을 단계적으로 올려주므로서 배전선로에서 발생하는 무효전력을 흡수하여 무효전력의 공급 및 무효전력의 소비가 균등하도록 제어한다.

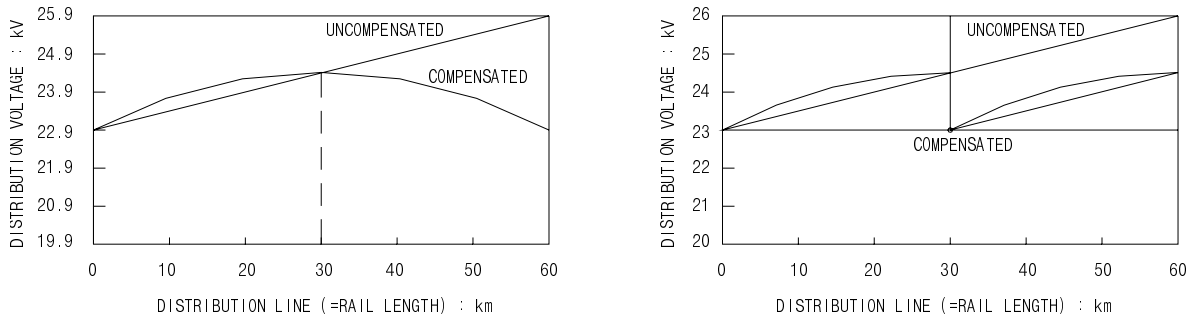

그림 5 배전전압과 선로길이와의 관계

상기 그림 5의 배전전압과 선로길이와의 관계에서 배전선의 굵기 22.9 kV CNCV-W 60㎟를 기준으로 대략 30km 지점에서 선로 보상이 이루어지면 전압이 개선되고 중간지점에서 장력이 저감되어 계통운영을 안정하게 할 수 있다.

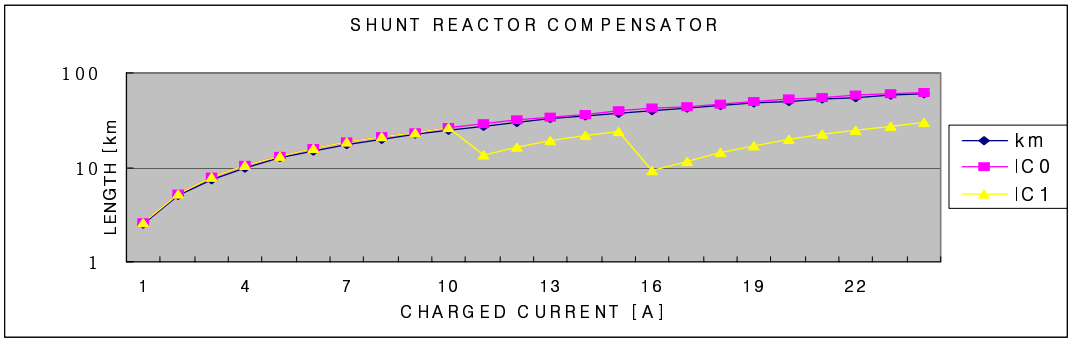

그림 6 배전선로 길이와 충전전류와의 관계

상기 그림 6의 배전선로 길이와 충전전류와의 관계에서 Shunt compensator 장치가 없는 충전전류(I_{C0})는 선로 거리에 비례하여 증가하며 선로길이 30km 부근에 Shunt compensator를 설치할 경우 충전전류(I_{C1})는 감소되다가 선로길이에 따라 상승되는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

주로 열차 운전이 정지되는 야간 시간대에서는 충전전류의 지속적인 증가에 의한 특고압(22.9kV) 배전계통은 자연적으로 진상운전 상태로 되어 수전설비 및 중간 전기실의 변압기와 차단기 단자측에 요구하지 않은 계통전압이 상승하여 악영향을 일으킬 수 있다. 그러므로 배전계통에 접속되어 있는 직렬기기에 과전압이 인가되어 기기의 수명 감소, 절연내력 저하, 전기 화재 및 지속성 과전압에 의한 차단기 개폐불능 등의 악영향을 가져올 수 있다. 따라서 가변형 분로리액터를 부하량의 증감에 대응하여 적정하게 조정하여 이러한 문제점들을 개선함으로서 철도배전선로 계통안정 운전 효율의 향상과 경제적인 운영을 달성 시킬 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

1. “POWER SYSTEM ANALYSIS” McGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS
2. “POWER SYSTEM ANALYSIS” JOHN J.GRAINGER & WILLAM D.STEVENSON,JR.
3. 정용기(2003) “신전기설비 기술계산 핸드북” 제3판 (주)의제전기설비연구원
4. “변전건설설계” 한국전력공사 서울연수원
5. 김정철(2001) “전기기술” 기다리