

철도 부하의 동적 특성을 고려한 전류 불평형의 분석과 보상

(Analysis and compensation of the current unbalance considering dynamic characteristic of feeding traction loads)

김기표* · 김진오

(Gi - Pyo Kim · Jin - O Kim)

요 약

3상 전력계통에 단상 대용량의 전철부하가 접속되면 3상 전류가 불평형하게 되어 역상 전류가 흐르게 된다. 이 역상전류는 전원 측 발전기의 회전자 표면에 과전류를 발생시키며, 급전계통 및 관련 설비에 나쁜 영향을 끼치게 된다. 현재 교류 전기철도에서는 불평형 경감을 위하여 Scott결선 변압기를 채용하고 있으나 2차 측의 서로 다른 단상부하 크기 및 위상을 동일하게 일치시킬 수는 없고, 회생부하 전기차 도입과 인근 변전소 사고로 인한 연장급진도 고려해야 되기 때문에 역상전류 보상이 필요하다. 본 논문은 기존의 전류불평형 해석방법인 정적모델 평가기법 대신에 열차운행스케줄에 따른 동적 특성을 이용한 새로운 전류불평형 평가기법을 유도하였으며, 이를 통해 부하 측의 불평형에 의해 발생하는 역상전류를 흡수하기 위한 보상기를 제안하고 실 계통에 가까운 전류불평형 문제를 분석하였다.

Abstract

Feeding traction loads from the public power system may lead to some current and voltage unbalance and consequently affects the operation of its energy-supply system and other equipment connected with it. This paper introduces an analysis of the current unbalance caused by the demands of an electric railway on a public power system. And the results with compensator and without compensator are simulated, and eventually the formula about the current unbalance is suggested. The Scott-connected transformer is adopted in Korea National Railway System. So Scott-connected transformer among the various transformer connection schemes is analyzed in this paper. Also, the formulas about the unbalance and compensating current can be derived by using two parameters(M-phase and T-phase current) of secondary Scott-connected transformer. So, the practical and accurate simulation can be done through dynamic models by using scheduling of traction.

Key Words : Feeding traction loads, current unbalance, scheduling of traction, Scott-connected transformer, dynamic models, compensator.

1. 서 론

* 주저자 : 한양대학교 전기공학과 석사과정
Tel : 02-2290-0347, Fax : 02-2297-1569
E-mail : jokim@hanyang.ac.kr
접수일자 : 2002년 9월 30일
1차심사 : 2002년 10월 9일
2차심사 : 2002년 11월 5일
심사완료 : 2002년 12월 3일

일반 전력계통 부하는 3상 평형부하인 반면에 전기 철도 부하는 단상 대용량 부하로, 시/공간적으로 부하 변동이 극심한 전기적 특성을 갖고 있다. 이로 인해 3상 전류의 불평형이 발생하여 역상전류가 흐르게 된다. 이로 인해 전원 측 발전기의 가능 출력 저하와 기계적 진동의 원인이 되고, 동일 모선 수용가의 전동기 출력감소 및 온도상승을 초래하며, 회전기 등의 회전

토크 저하를 가져 올 수 있다. 이에 대한 대책으로는 현재 전철변전소에 Scott결선 변압기를 채용하여 전압, 전류의 불평형을 해소하고 있다.

이 Scott결선 변압기는 3상 전력을 수전 받아 1상 부하에 공급하더라도 3상 평형이 이루어지는 원리이지만, 2차측 M/T와 부하 및 위상이 일치해야만 가능하기 때문에 실제적으로는 전원 측에 3상 전류불평형 문제를 야기하게 된다.

따라서 본 논문에서는 이 전류불평형 문제를 해소하기 위하여 역상전류 보상이 설치방안을 제시하고, 열차운행표를 활용한 동적 모델 방법을 이용함으로써 더욱 정확하고 실제에 근접한 전류불평형의 분석이 이루어 질 수 있다. 참고로 이 논문에서는 역상전류의 해석에 근간을 두었기 때문에 전류 불평형에 대해서만 고려하였다.

2. 본 문

철도부하는 시간에 따라 부하 용량이 변하는 특성을 갖고 있기 때문에 동적 특성을 고려 해주어야 만이 정확하고 실제적인 해석을 할 수 있다. 기존의 논문은 주로 이러한 철도 부하의 동적 특성을 고려하지 않은 해석법으로 전압 불평형과 전류 불평형에 대해 다루고 있다. 본 논문은 철도부하의 동적 특성을 운행 스케줄표를 이용하여 나타내고 있다. 또한 스코트 결선 변압기의 2차측 파라미터 만으로 수식을 유도하여 전류불평형식과 보상 전류식을 새로이 제시하였고 이러한 수식과 열차 운행 스케줄표를 활용하여 해석한다.

2.1 새로운 전류 불평형식의 유도

그림 1은 전류불평형의 분석과 역상전류 보상을 위한 전철급전 시스템의 예를 보여주고 있다.

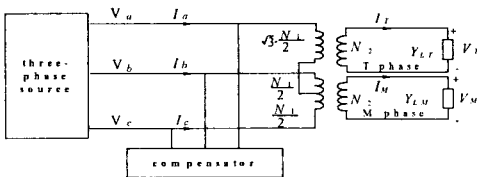


그림 1. 스코트 변압기와 보상기를 포함한 철도 시스템
Fig. 1. Diagram of railway system with Scott-connected transformer and compensator

또한 Scott결선 변압기의 전압과 전류 벡터도는 그림 2와 같다.

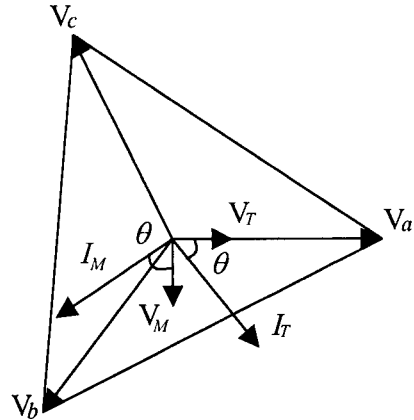


그림 2. Scott 변압기의 전압과 전류의 벡터도
Fig. 2. Voltage and current vector diagram of Scott-connected transformer

여기서 V_T, V_M : T상과 M상의 전압 [kV]

I_T, I_M : T상과 M상의 전류 [A]

V_a, V_b, V_c : 1차측 상전압 [kV]

S_M, S_T : M상과 T상의 용량 [MVA]

Y_{LM}, Y_{LT} : M상과 T상의 총 어드미턴스

I_{MP}, I_{TP} : M상과 T상의 1차측 등가전류[A]

N_1, N_2 : 1차측과 2차측의 감은 권선수

V_P : 1차측 전압 [kV]

$a = -0.5 + 0.866j$ (연산자), θ : 역률

Scott결선 변압기에서는 M, T상의 1차, 2차 권선은 각각 동일철심으로 감겨져 있으므로 변압기 임피던스를 무시하면 V_M 은 bc 선간전압 V_{bc} 와 동상이고 V_T 는 V_a 와 동상이 된다.

그림 1과 2로부터

$$I_M = \frac{S_M}{V_M} \angle -90 - \theta, \quad I_{MP} = \frac{V_M}{V_P} \times I_M$$

$$I_T = \frac{S_T}{V_T} \angle -\theta, \quad I_{TP} = \frac{V_T}{V_P} \times I_T \quad (1)$$

철도 부하의 동적 특성을 고려한 전류 불평형의 분석과 보상

즉, I_{MP} , I_{TP} 와 I_M , I_T 의 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{N_2}{N_1} I_T = I_{TP}, \quad \frac{N_2}{N_1} I_M = I_{MP} \quad (2)$$

따라서, $I_T = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{N_1}{N_2} I_a$ 에서

$$I_a = \frac{2}{\sqrt{3}} I_{TP} \quad (3)$$

$I_M = -\frac{N_1}{N_2} I_c - \frac{1}{\sqrt{3}} I_T$ 에서

$$I_c = -I_{MP} - \frac{1}{\sqrt{3}} I_{TP} \quad (4)$$

계통의 1차측은 비접지이므로

$$\begin{aligned} I_b &= -I_a - I_c \\ &= I_{MP} - \frac{1}{\sqrt{3}} I_{TP} \end{aligned} \quad (5)$$

대칭 3상전류 공식에 식(3), (4), (5)를 대입하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} I_0 &= \frac{1}{3} \left(\frac{2}{\sqrt{3}} I_{TP} - \frac{2}{\sqrt{3}} I_{TP} \right) \\ I_1 &= \frac{1}{3} \left(\frac{3}{\sqrt{3}} I_{TP} + (2a+1) I_{MP} \right) \\ I_2 &= \frac{1}{3} \left(\frac{3}{\sqrt{3}} I_{TP} - (2a+1) I_{MP} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

따라서 전류 불평형 지수는 식(7)과 같이 정의 된다[1].

$$\frac{|I_2|}{|I_1|} = \left| 1 - \frac{2(2a+1) I_{MP}}{\frac{3}{\sqrt{3}} I_{TP} + (2a+1) I_{MP}} \right| \quad (7)$$

2.2 3상 불평형 전류 분석 및 보상 전류 식의 유도

(1) 불평형 3상 전류의 분석

전기철도 급전 계통의 MT와 단상부하에 불균형이 생기면 전원측 3상 전류의 불평형이 발생하게 되고 역상전류가 흐른다. 이로 인해 전원 측 발전기의 과열현상으로 출력저하와 기계적 진동의 원인이 된다. 또한 동일모선의 전동기 출력감소 및 온도상승을 초래하며, 회전기 과열과 변압기 포화를 가져오게 된다.

그림 3은 d-q변환의 일반 벡터도이다. 전압, 전류, 쇠교자속 등과 같은 변수들을 2축 고정 좌표계로 변환하면 독립변수의 수가 감소하여 취급하기 편해진다. 변수들은 3상에서의 변수들과 마찬가지로 여전히 정현파 교류가 되므로 제어 알고리즘에 적용하기 불편하다. 따라서, 이를 다시 동기속도 ω 로 회전하는 회전좌표계(d, q축)로 변환하면 직류성분으로 되어 취급하기 편리해진다.

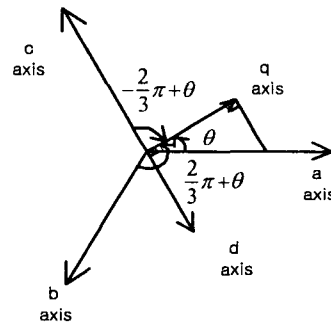


그림 3. a,b,c축과 q,d,0축의 변환
Fig. 3. Relationship between the a-b-c and q-d-0 quantities

qd0 축이 전원의 각주파수 ω [rad/sec]로 회전할 때를 동기 좌표축이라 하며, 이때 q축과 a축 사이의 각은 $\theta (= \omega t)$ 가 된다. 전원 각주파수 ω 로 회전하는 성분에 대해 동기좌표축 qd0변수는 직류값을 갖게 된다. q축 성분은 유효 성분으로 나타나고 d축 성분은 무효성분으로 나타난다.

3상3선식 시스템에서 부하전류의 기본파 성분과 정상분 기본파 성분 i_{a01} 과 역상분 기본파 성분 i_{a01} 의 합으로 표현할 수 있다.

$$i_{La} = I_{m\phi l} \cos(\omega t + \Phi_{\phi l}) + I_{mnl} \cos(\omega t + \Phi_{nl}) \quad (8)$$

$$i_{Lb} = I_{m\phi l} \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi + \Phi_{\phi l}) + I_{mnl} \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi + \Phi_{\phi l}) \quad (9)$$

$$i_{Lc} = I_{m\phi l} \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi + \Phi_{\phi l}) + I_{mnl} \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi + \Phi_{\phi l}) \quad (10)$$

식(8)~식(10)의 3상 abc축 전류를 동기좌표축으로 변환하면, 식(11), (12)와 같이 abc축 부하전류의 기본파는 정상분과 역상분의 합이 된다[4].

$$i_{La} = I_{m\phi} \cos \Phi_{\phi l} + I_{mnl} \cos(2\omega t + \Phi_{nl}) \quad (11)$$

$$i_{Ld} = -I_{m\phi} \sin \Phi_{\phi l} + I_{mnl} \sin(2\omega t + \Phi_{nl}) \quad (12)$$

여기서, $I_{m\phi}$, I_{mnl} : 정상과 역상 성분의 최대전류
 Φ_{ϕ} , Φ_n : 정상과 역상 성분의 임의의 각

보상기가 불평형 부하를 평형화하기 위해서 부하 전류 중에 역상분 전류를 제거해야 하기 때문에 식 (13), (14)와 같이 보상전류 i_{cq} 와 i_{cd} 을 발생시켜야 한다. 즉, $I_2 = i_{Lqnl} + i_{Ldnl}$ 로부터

$$i_{cq} = -(i_{Lqnl}) \quad (13)$$

$$i_{cd} = -(i_{Ldnl}) \quad (14)$$

(2) 보상전류의 유도

I_2 는 불평형 전류를 보상하기 위해서 $i_{cq} + i_{cd}$ 을 역상분 전류 I_2 에 합성한 값이다.

$$I_2 = \frac{1}{3}(I_a + a^2 I_b + a I_c) + i_{cq} + i_{cd} \quad (15)$$

따라서, a, b, c 상의 보상후 전류 I_{aa} , I_{bb} , I_{cc} 는 다음과 같다.

$$I_{aa} = I_a + i_{cq} + i_{cd} \quad [A] \quad (16)$$

$$I_{bb} = I_b + a(i_{cq} + i_{cd}) \quad [A] \quad (17)$$

$$I_{cc} = I_c + a^2(i_{cq} + i_{cd}) \quad [A] \quad (18)$$

즉, 보상 전류의 공식은 아래와 같이 정의된다.

$$I_{Sa} = I_a - I_{aa} = -(i_{cq} + i_{cd}) \quad [A] \quad (19)$$

$$I_{Sb} = I_b - I_{bb} = -a(i_{cq} + i_{cd}) \quad [A] \quad (20)$$

$$I_{Sc} = I_c - I_{cc} = -a^2(i_{cq} + i_{cd}) \quad [A] \quad (21)$$

3. 사례 연구

사례연구는 우리나라 및 전 세계적으로 교류 표준 급전 방식으로 되어있는 AT급전방식의 국내 표준 급전계통 입력자료를 이용하였다.

그림 4는 시간경과에 따른 전철 부하용량을 보여 주고 있고, 그림 5는 열차운행 스케줄의 예이다. 열차의 동적 특성이 고려된 열차운행 스케줄과 앞서 언급한 공식을 이용한 전류 불평형에 관한 파형은 아래와 같이 각각 나타난다. 본 논문에서는 정상상태 운행시의 정상급전 'A' 구간과 인근 전철변전소 사고에 의한 연장급전 구간을 보여주고 있다.

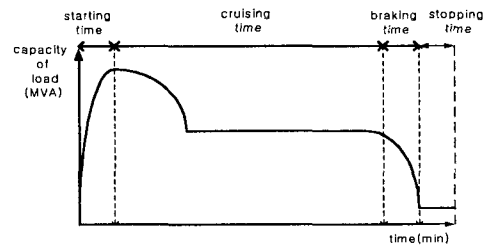


그림 4. 시간에 따른 철도 부하 용량
 Fig. 4. Profile of load capacity

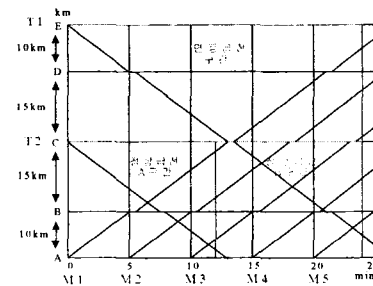


그림 5. 열차 운행표
 Fig. 5. Scheduling of traction

철도 부하의 동적 특성을 고려한 전류 불평형의 분석과 보상

여기서, T_1, T_2 T상의 열차 번호
 $M_1 \sim M_5$: M상의 열차 번호
 A, B, C, D 그리고 E : 열차의 각 정거장
 열차의 속도: 120[km/h], 기동 시간: 0.5[min]
 제동 시간: 1[min], 정지 시간: 0.5[min]
 순항 시간: 나머지[min]
 S_M, S_T 10[MVA], V_T, V_M 25[kV]
 V_P : 154[kV], $\cos \theta$: 0.8

(1) 정상 급전 'A' 구간

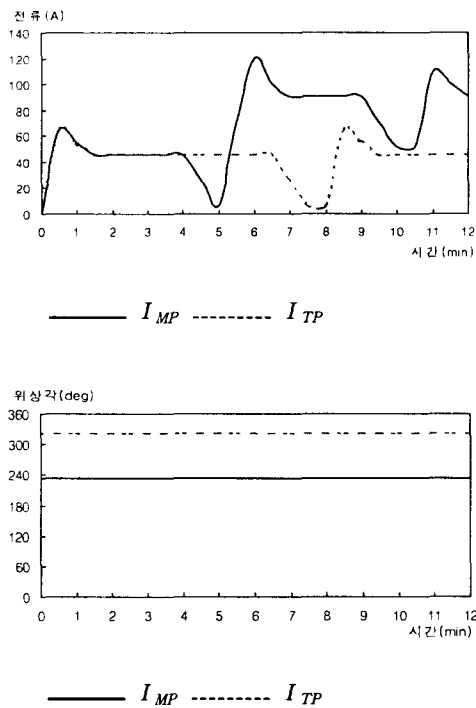


그림 6. 보상전 I_{MP}, I_{TP} 의 크기와 위상각
 Fig. 6. Magnitude and angle of I_{MP}, I_{TP}

열차 운행표에서 보여지듯이 정상급전 'A' 구간 내에서 M상의 부하량이 T상보다 대체로 크기 때문에 그림 6에서와 같이 I_{MP} 의 크기가 I_{TP} 보다 대체로 큰 파형으로 나타난다. 그림 6에서 5분에서 6분 사이에 M상 전류의 큰 변동폭은 이 시간대에서 M상의 부하량이 크게 증가하고 있음을 보여준다.

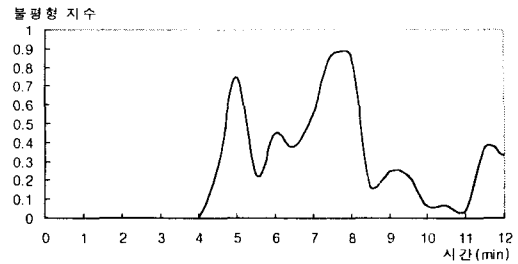


그림 7. 전류 불평형(보상전)
 Fig. 7. Current unbalance (before compensation)

그림 7에서 I_{MP} 와 I_{TP} 사이의 차가 거의 없는 구간에서는 불평형이 거의 0에 가깝고 가장 큰 8분 경에서 전류 불평형 값이 최대가 됨을 볼 수 있다.

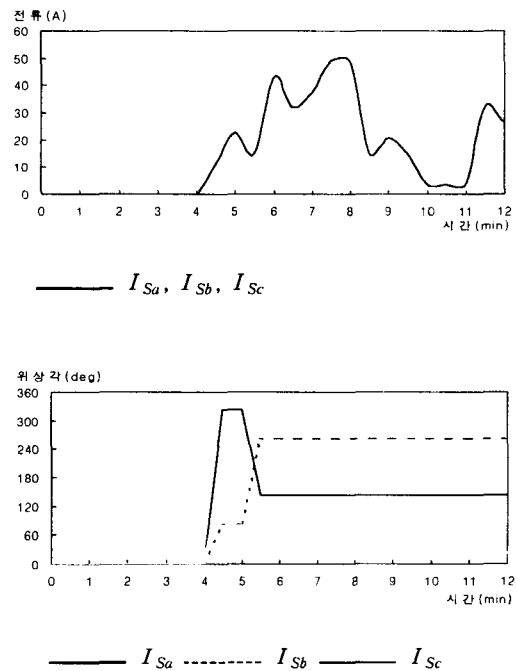
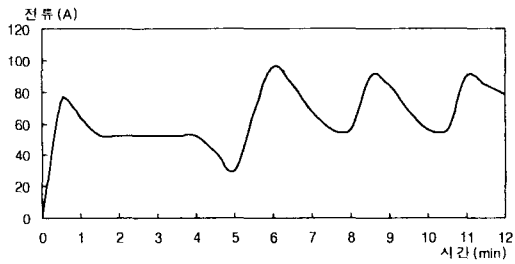


그림 8. 보상전류 I_{Sa}, I_{Sb}, I_{Sc} 의 크기와 위상각
 Fig. 8. Magnitude and angle of I_{Sa}, I_{Sb}, I_{Sc}

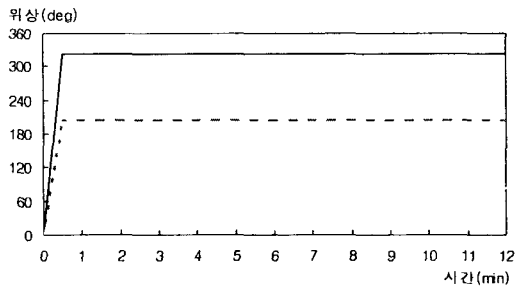
그림 8은 보상전류의 크기와 위상각을 나타낸다. 여기서 전류 불평형이 일어나는 기점부터 보상전류의 값이 나타남을 볼 수 있다. 또한 보상전류의 크기는 각상마다 동일한 양이 흐른다. 그리고 위상각은

120° 차이를 두고 서로 평행하다.

그림 9는 보상후의 전류의 크기와 위상각을 보여 주고 있다. 여기서 보상후의 각상 전류의 크기는 시간에 따라 유동적이고 각 상의 전류 값은 동일하다. 또한 위상각은 120° 차이를 두고 평행함을 보여주고 있다.



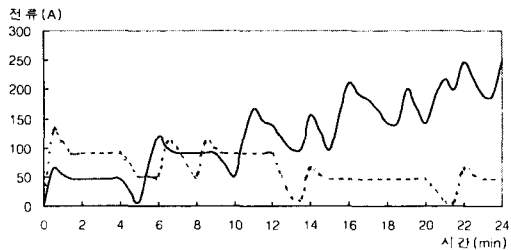
— I_{aa} , I_{bb} , I_{cc}



— I_{aa} - - - I_{bb} - . - I_{cc}

그림 9. I_{aa} , I_{bb} , I_{cc} 의 크기와 위상각
Fig. 9. Magnitude and angle of I_{aa} , I_{bb} , I_{cc}

(2) 연장 급전 구간



— I_{MP} - - - I_{TP}

조명 · 전기설비학회논문지 제17권 제1호, 2003년 1월

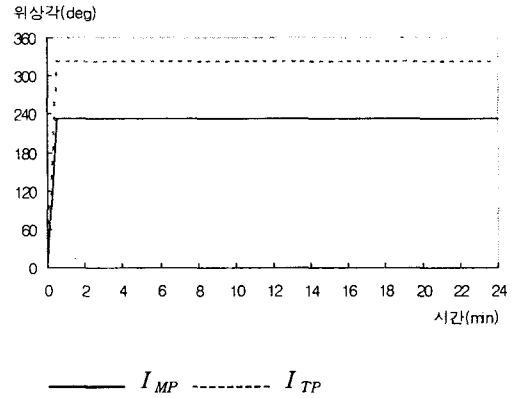


그림 10. 보상전 I_{MP} , I_{TP} 의 크기와 위상각
Fig. 10. Magnitude and angle of I_{MP} , I_{TP}

그림 10은 연장급전 시 I_{MP} 와 I_{TP} 의 크기와 위상각을 보여주고 있다. 열차 편수의 차이로 인해 시간이 경과함에 따라 전류의 크기는 차이가 심해진다. 그림 11은 연장급전 시 전류불평형의 지수를 보여주고 있다. I_{MP} 와 I_{TP} 의 차이가 가장 커지는 22분 경에 전류 불평형 값이 최대가 된다. 또한 일반적으로 정상 상태보다 불평형 지수가 크다.

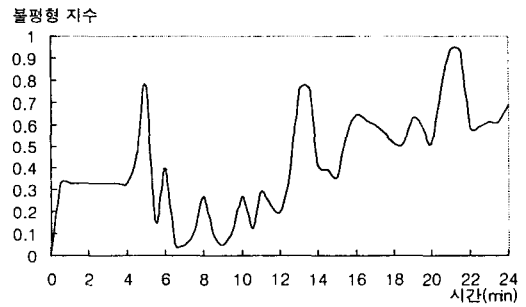


그림 11. 전류 불평형(보상전)
Fig. 11. Current unbalance (before compensation)

그림 12는 보상전류의 크기와 위상각을 나타내고 있다. 여기서 I_{MP} 와 I_{TP} 의 차이가 큰 16분경 이후 부터 보상전류의 전체적인 값이 크게 나온다. 또한 5분에서 10분 사이에서 각상의 용량 변화 때문에 위상의 변동이 크다.

철도 부하의 동적 특성을 고려한 전류 불평형의 분석과 보상

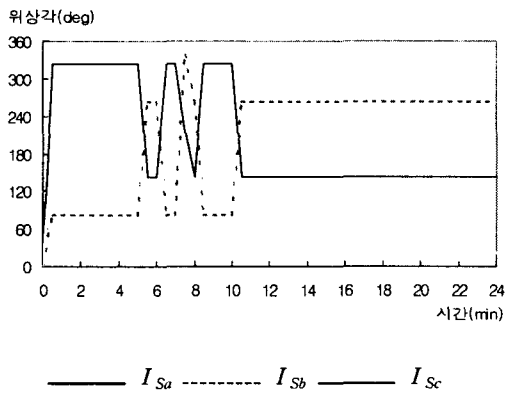
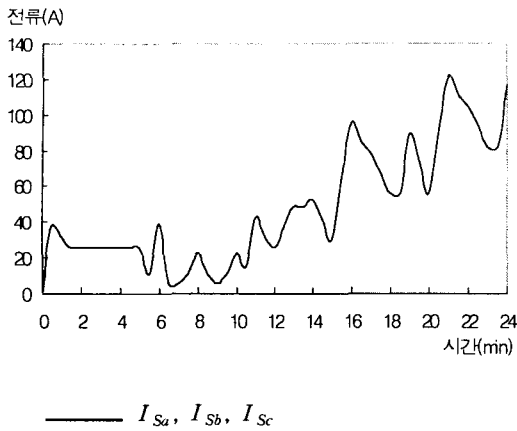


그림 12. 보상전류 I_{Sa} , I_{Sb} , I_{Sc} 의 크기와 위상각
Fig. 12. Magnitude and angle of I_{Sa} , I_{Sb} , I_{Sc}

4. 결 론

3상 전력계통 부하는 평형부하인 반면에 전기철도 부하는 단상 대용량 부하로, 시/공간적으로 부하변동이 극심한 전기적 특성을 갖고 있다. 이로 인해 3상 전류의 불평형이 발생하여 역상전류가 흐르게 된다. 이 논문은 역상전류로 인한 불평형 문제를 해석하기 위해 전류 불평형 문제에 대해서 고려하고 있다. 그리고 교류 전기철도 급전계통에 있어서 필연적으로 나타나는 3상 전류 불평형과 보상전류 값을 스코트 결선 변압기의 M상과 T상의 전류 값만으로 구할 수 있는 수식을 유도하였다. 사례연구에서 알 수 있듯이 정상 급전 보다 연장급전 상태에서 불평형 문제가 심각함

을 알 수 있었다. 또한 유도된 수식에 의한 보상알고리즘에 의해 보상후 전류는 정상급전과 연장급전 모두 불평형 문제가 제거되었다.

이 논문은 기존의 정적 모델에 의한 전류 불평형 평가 기법 대신에 열차운행스케줄을 이용한 동적 모델에 의한 전류 불평형 접근 방식을 사용하여 분석하였다. 이와 같이 열차의 시간에 따른 동적 특성을 고려함으로써 전철급전계통의 전류불평형이 좀더 실제적이고 정확한 해석이 될 수 있다. 본 논문에서는 정상급전 뿐만 아니라 연장급전의 경우를 확장하여 해석한 결과를 제공하고 있다.

- 감사의 글 -

본 논문은 한양대학교 2001년도 전기 특별교비 장학금을 지원 받아 수행되어진 논문입니다.

References

- [1] Tsai-Hsiang Chen, "Criteria to Estimate the Voltage Unbalance due to High-Speed Railway Demands", IEEE Trans. On Power Systems, Vol.9, No.3, August, 1994.
- [2] Tsai-Hsiang Chen, "Simplified Models of Electric Railway Substations for Three-Phase Power-Flow Studies", Conference Record of the 1994 IEEE Industry Applications Conference, Twenty-Ninth IAS Annual Meeting, Vol. 3, October 1994.
- [3] Cha, Jun-Min, Chang, Sang-Hoon, Oh, Kwang-Hae, "Assessment of Autotransformer-Fed Electric Traction Systems Using Thevenins Equivalent Circuit", The International Conference on Electrical Engineering, July 21-24, 1998.
- [4] Su-Saeng Lim, Eun-Woong Lee, Hong-Kwon Kim, "STATCOM Control for Balancing The Unbalanced Loads" Trans. KIEE, Vol. 49B, No. 8, August, 2000.

◇ 저자소개 ◇

김 기 표 (金起杓)

1974년 10월 2일생. 2001년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 현재 한양대학교 전기공학과 석사과정.

김 진 오 (金鎭吾)

1956년 1월 17일생. 1980년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 Texas A&M Univ. 전기공학과 졸업(박사). 현재 한양대학교 공과대학 전기공학과 부교수.