전기철도의 교류 급전변전소에서 PSIM을 이용한 스코트변압기 모델링

Scott Transformer Modeling using PSIM on the AC Substation in the Electric Railroad

김성대† 최규형*

Kim, Sung-Dae Choi, Kyu-Hyoung

ABSTRACT

In three-phase power, when the power is supplied to the single phase load, there is the unbalance of load in the three-phase power. So the scott transformer is used in the power system to supply a single phase load in three-phase power without the unbalance of loads. Especially, the scott transformer is used in the AC substation of electric railroad. Two single phase transformers are combined by T-wiring in the scott transformer. So, two single phase voltage is provided by differing 90° phase in three-phase power. The selection of related equipment and correction of protective relay are not easy from characteristic of the scott transformer when shunt and ground faults occur. PSIM(Power Electronics Simulator) is optimal simulation software in field of the power electronics and provide the simple and convenient user interface.

In this paper, electric model of the scott transformer is suggested and the current of the scott transformer in shunt and ground faults is analyzed. Also, the scott transformer model is demonstrated by using PSIM.

1. 서 론

전력용 3상전원에서 용량이 큰 단상부하에만 전원을 공급하게 되면 3상전원은 부하 불평형이 된다. Scott 결선 변압기는 부하 불평형 해소로 3상전원에서 단상부하를 공급해야 하는 계통에서 많이 사용되고 있다.[5] 특히 대용량의 단상부하를 사용하는 전기철도의 교류 급전변전소에 Scott 변압기가 설치 운전되고 있다. Scott 변압기는 단상 변압기 2대를 T결선하여 3상 전원에서 상차각 90도인 단상 2회선을 공급할 수 있도록 되어있으므로 Scott 변압기의 특성상 단상인 부하측 또는 3상인 전원측에서 사고 발생시 각상에 흐르는 불평형 사고전류의 예측이 어려워 관련기기의 선정과 각종 보호계전기의 정정이 쉽지 않다.[2] PSIM(Power Electronics Simulator)은 인버터, 컨버터와 같은 전력전자 분야에 최적화된 시뮬레이션 소프트웨어로 단순하면서도 편리한 사용자 인터페이스를 제공한다.

본 논문에서는 Scott 변압기의 전기적 모델을 제시하고, 단락 및 지락 사고에 대한 Scott 변압기의 전류를 해석하였다. 또한 PSIM을 이용하여 Scott 변압기의 모델을 입증하였다.

2. 본 론

2.1 스코트변압기

교류 전기철도에 운행되고 있는 대부분의 전기차는 단상 교류식이기 때문에 교류 급전시스템은 3상 전원계통으로부터 단상 교류를 공급하게 된다. 이와 같이 3상 전력계통으로부터 단상 교류를 공급받아 대용량의 전기차를 운행하는 경우에는 3상 전원계통에 심각한 전압불평형을 발생시킬 수 있으며, 이러한 불평형으로 인해 3상 기기에 역상 전류가 흐르게 되며, 회전기 등에 과열이나 토크 감소 등의 피해

† 책임저자 : 정회원, 서울산업대학교 철도전문대학원, 철도전기신호공학과, 석사과정
E-mail : mangdae@snut.ac.kr
TEL : (02)970-6883
* 정회원, 서울산업대학교 철도전문대학원, 철도전기신호공학과, 교수

가 발생할 수 있다. 이로 인해 전기철도에서는 [그림 1]과 같이 3상 전력을 2조의 단상 교류전력으로 변환하는 스코트변압기를 적용하고 있으며, 단상으로 변환된 2조의 단상 전력을 방면별 또는 상하선별로 공급하도록 급전회로를 구성하여 전압 불평형을 최소화하고 있다.[2]

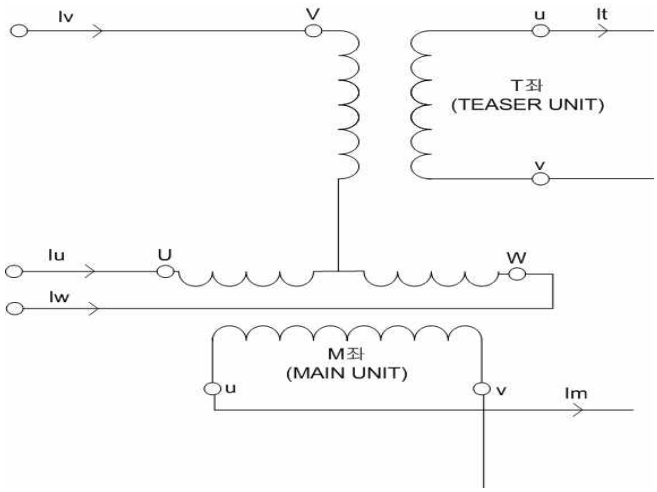


그림 1. 스코트변압기의 결선도

스코트변압기는 3상 전원계통의 전압불평형을 최소화하기 위해서 [그림 1]과 같이 1, 2차의 권선비가 $N:n$ 인 단상변압기(M좌) 1대와 권선비가 $(\sqrt{3}/2)N:n$ 인 단상변압기(T좌) 1대를 M좌 변압기 1차권선의 중성점을 단락시켜 T좌와 결선한 변압기로 2조의 단상 전력(M좌, T좌)을 급전계통에 방면별 또는 상하선별로 전력을 공급한다. 2차측 전압을 동일하게 하기 위해 M좌 변압기의 권수비를 1:1로 하고, T좌 변압기의 권수비를 $(\sqrt{3}/2):1$로 하며, 1차측은 비접지로 하고 있다. T상이 M상 권선의 중앙점에 결선되어 있으므로 T상의 전류가 M상 중앙점에서 권선 좌우에 각각 균등히 흘러 M상에는 Ampere-turn 수가 같고 방향이 반대인 자속이 발생하게 된다. M좌 철심의 자속은 서로 상쇄되므로 T상 전류는 M상에 영향을 미치지 않고, T상 임피던스 Z_T와 M상의 임피던스 Z_M이 같으면 T상과 M상의 전압강하가 같게 된다.[5]

스코트 변압기의 1, 2차의 전류관계는 식(1)과 같으며, M좌와 T좌에 동일한 부하를 접속한 경우 1차측인 3상 전류는 크기가 $(2I_T/\sqrt{3})$이며, 위상각이 120°차이가 나는 3상 평형전류가 흐르게 된다. 또한 2차측은 크기가 같고 위상차가 90° 나는 단상전원 2개가 발생하게 된다.[5]

$$
\begin{aligned}
I_U &= I_M - \frac{I_T}{\sqrt{3}} = (-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2})(\frac{2I_T}{\sqrt{3}}) \\
I_V &= \frac{2I_T}{\sqrt{3}} = (\frac{2I_T}{\sqrt{3}}) \\
I_U &= -I_M - \frac{I_T}{\sqrt{3}} = (-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2})(\frac{2I_T}{\sqrt{3}})
\end{aligned} \tag{1}
$$

2.2 변압기 특성 데이터

변압기의 특성 데이터는 일반적으로 변압기 시험 성적서(Factory test reports)에서 얻을 수 있다. 시험 성적서에는 [표 1]과 같이 무부하손과 여자전류, 부하손과 임피던스 등이 포함되어 있다. 무부하손 및 여자전류 측정시험(Open-Circuit Test)에서는 일반적으로 M좌와 T좌권선 각각의 100%와 110%전압에서의 여자전류와 무부하손을 측정하고 있다.[1]

단락시험(Short-Circuit Test)에는 다음과 같은 것들이 있다.

- M좌, T2차 모두 단락한 상태에서 1차에 3상 전압을 인가하는 경우

- M좌 2차만 단락한 상태에서 M좌 1차에 단상전압을 인가하는 경우
- T좌 2차만 단락한 상태에서 T좌 1차에 단상전압을 인가하는 경우
- M좌 T좌 2차 모두 개방한 상태에서 U +M과 M단자에 단상전압을 인가하는 경우

표 1. 스코트변압기 시험 성적서[1]

Scott Transformer 154000 Grd. Y/55000V-단상/55000V단상 M좌-15/20MVA, T좌-15/20MVA @ONAN/ONAF		
Open-Circuit Test	**Exciting Current**	**No Load Loss**
M좌 @100%V	0.75 Arms @2차 (0.206% @20MVA)	16.447 kW
M좌 @110%V	1.36 Arms @2차 (0.374% @20MVA)	22.020 kW
T좌 @100%V	0.83 Arms @2차 (0.228% @20MVA)	21.828 kW
T좌 @110%V	1.55 Arms @2차 (0.426% @20MVA)	30.200 kW
Short-Circuit Test	**Impedance**	**Load Loss**
M좌, T좌 2차 모두 단락	13.149% @40MVA	165.584 kW @40MVA
M좌 2차만 단락	13.189% @20MVA	70.151 kW @20MVA
T좌 2차만 단락	9.093% @20MVA	58.535 kW @20MVA
U+M과 M단자에 인가 M좌, T좌 2차 모두 개방	6.960% @11.55MVA	41.132 kW @11.55MVA

2.3 스코트변압기 모델링

본 논문에서는 PSIM에서의 스코트변압기 모델링을 위해서 [그림 1]과 같이 M좌에는 3권선 변압기 1개를, T좌에는 2권선변압기 1개를 사용하였다. M좌 2차측을 중성점으로 단락시켜 T좌와 연결하였고 권선비는 M좌가 0.5 : 0.5 : 1, T좌가 $(\sqrt{3}/2):1$ 이다. R상과 T상은 M좌의 1차측에, S상과 M좌의 중성점은 T좌의 1차측에 연결된다.

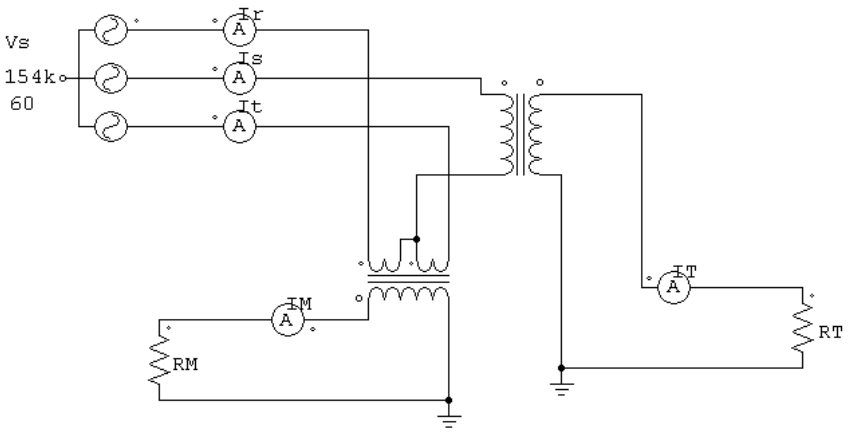
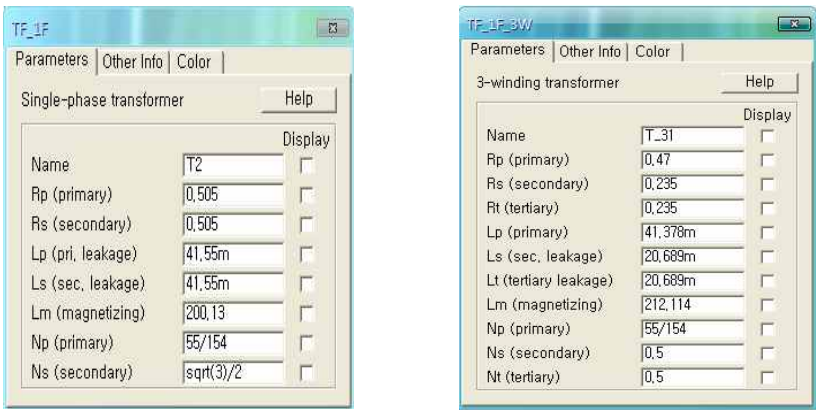


그림 2. PSIM에서의 스코트변압기 모델링

PSIM에서의 변압기 Elements는 보다 정확한 시뮬레이션을 위해 [그림 3]과 같이 Practical 변압기의 입력 데이터들이 있다. R_p와 R_s, R_t는 1차와 2차측의 동손저항을, L_p와 L_s, L_t는 1차와 2차측의 누설(Leakage) 인덕턴스를 나타내며 이들은 Short-Circuit Test의 데이터들로부터 구할 수 있다. L_m은 자화 인덕턴스를 나타내며, L_m은 변압기 시험성적서의 Open-Circuit Test 데이터들로부터 얻을 수 있다.[3]



(a) T좌측 데이터 (b)M좌측 데이터

그림 3. PSIM에서 M좌와 T좌 변압기의 데이터 입력

Short-Circuit Test에서 1, 2차의 합성 동손저항 R_{eq}, 합성 누설 인덕턴스 L_{eq}는 식(2)와 같으며, 이를 통해 각각의 동손저항 R_p와 R_s, R_t, 누설인덕턴스 L_p와 L_s, L_t를 구할 수 있다.

$$R_{eq} = P/I^2 \tag{2}$$
$$L_{eq} = P_r/I^2$$

여기서 P : 부하손(유효전력) [w]

P_r : 무효전력 [Var]

Open-Circuit Test에서 변압기의 철손저항 R_c는 식(3)과 같고, 이를 통해 자화전류 I_m을 구할 수 있다.[4]

$$R_c = E^2/W$$
$$I_m = \sqrt{I_\psi - (E/R_c)^2} \tag{3}$$

여기서 E : Open-Circuit Test 입력전압 [V]

W : 무부하손 [w]

I_ψ : 여자전류(Exciting Current) [A]

자화전류 I_m을 이용해 리액턴스 X_m을 구할 수 있고, 이를 인덕턴스로 변환하면 식(4)과 같이 정리할 수 있다.

$$X_m = E/I_m \tag{4}$$
$$L_m = X_m/2\pi f$$

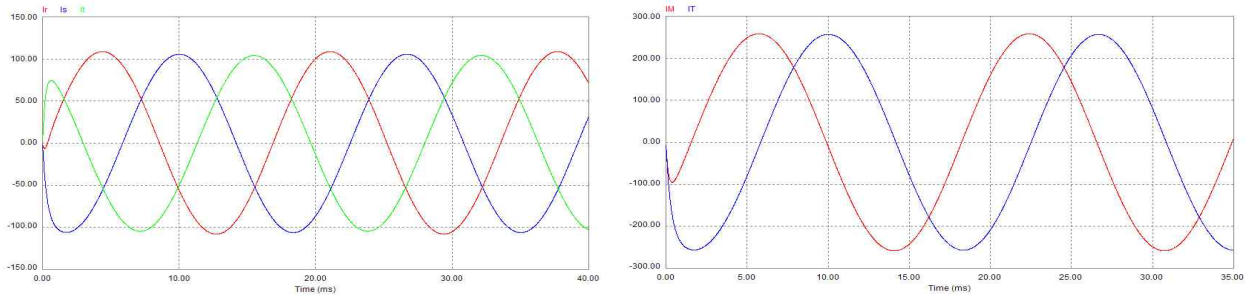
여기서 f : 입력전원 주파수 [Hz]

L_m : 자화 인덕턴스 [H]

2.4 시뮬레이션

전기철도의 교류 급전변전소에서 스코트변압기의 시뮬레이션을 위해 변압기 회로를 2.3절의 [그림 1]과 같이 모델링하였고, PSIM을 통해 모델을 분석하였다. 동손저항과 누설인덕턴스, 자화인덕턴스 등 변압기 특성데이터를 계산해 입력하였으며, 1차측의 입력전압은 60[Hz]의 3상 154[kV]의 전압을 인가하였고, 2차측 전압은 단상 55[kV]가 출력되도록 M좌의 권선비는 (0.5: 0.5: 55/154), T좌의 권선비는 ($\sqrt{3}/2$: 55/154)로 하였다.

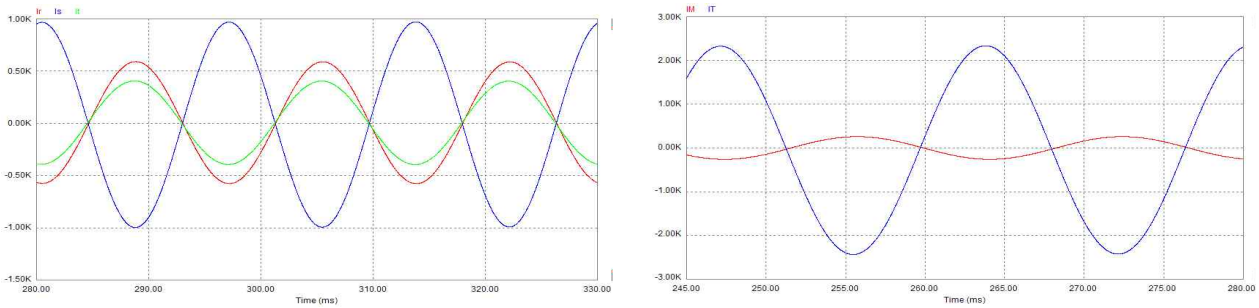
[그림 4]는 M좌와 T좌의 부하크기가 같을 때 1차측의 3상 및 M좌, T좌의 부하전류 크기를 나타낸 것으로 단상부하의 크기가 같은 경우에는 M좌, T의 전류 크기뿐만 아니라 3상 전류의 크기도 같음을 알 수 있다. 또한 1차측의 3상전류는 120°의 위상차를 보이며 평형을 이루고 있고, 2차측의 부하전류는 90°의 위상차가 남을 알 수 있다.



(a) M좌, T좌 부하평형시 1차측 전류 (b) M좌, T좌 부하평형시 2차측 부하전류

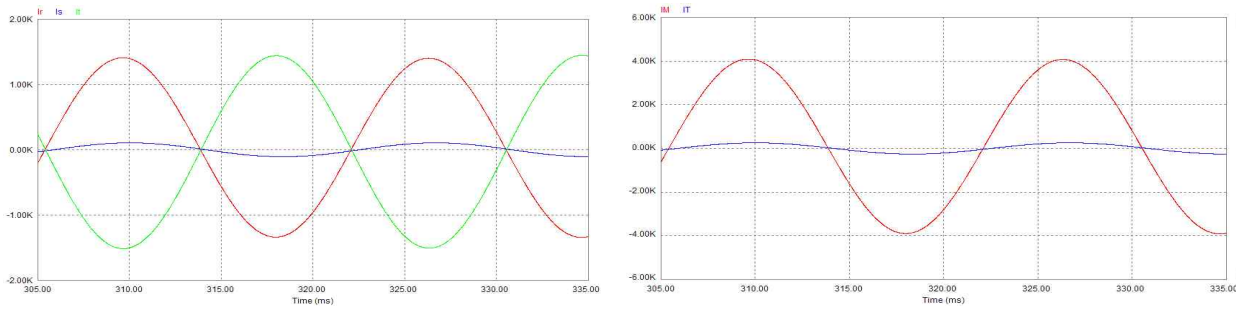
그림 4. M좌, T좌 부하평형시 1, 2차 전류

[그림 5]는 T좌 2차에서 지락시 1, 2차의 전류를 [그림 6]은 M좌 2차에서 지락시 1, 2차의 전류파형을 나타내고 있다.



(a) T좌 2차에서 지락시 1차측 전류 (b) T좌 2차에서 지락시 2차측 전류

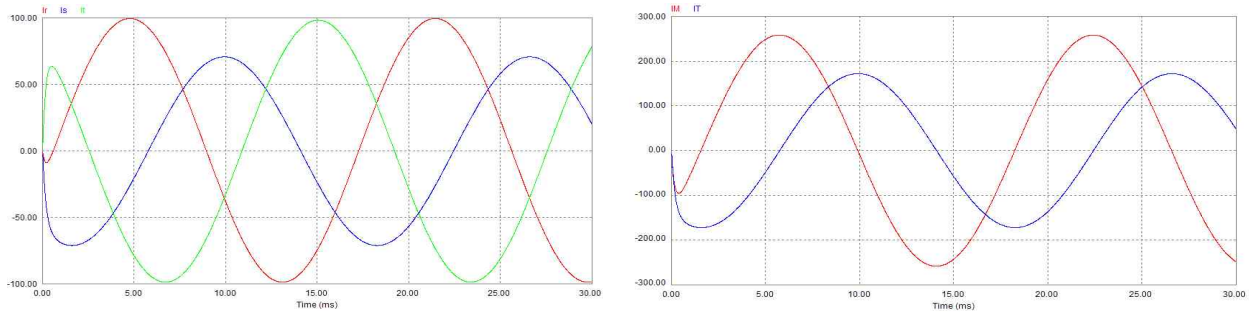
그림 5. T좌 2차에서 지락시 1, 2차 전류



(a) M좌 2차에서 지락시 1차측 전류 (b) M좌 2차에서 지락시 2차측 전류

그림 6. M좌 2차에서 지락시 1, 2차 전류

[그림 7]은 T좌의 부하크기가 M좌에 비해 50%일 때, 즉 부하크기가 다른 경우에 1차측의 3상 및 2차측 부하전류를 나타낸 것으로 M좌 전류량이 증가함에 따라 M좌와 연결된 3상 전원측의 R상과 T상에 흐르는 전류가 S상에 흐르는 전류보다 크게 발생함을 알 수 있다.



(a) 부하 불평형시 1차측 전류 (b) 부하 불평형시 2차측 전류

그림 7. 부하 불평형시 1, 2차 전류

3. 결 론

교류 전기철도에서는 단상 부하인 철도차량에 전력을 공급하기 위해 3상 전원을 2개의 단상으로 변환하기 위한 스코트결선을 채택하여 운행하고 있다. 본 논문에서는 스코트변압기의 전기적 모델을 제시하고, 단락 및 지락 사고에 대한 스코트변압기의 전류를 해석하였다.

PSIM에서 스코트변압기는 3권선 변압기와 2권선 변압기를 스코트 결선하여 모델링 할 수 있었으며, 변압기 시험성적서의 데이터를 이용해 변압기의 동손저항과 누설 인덕턴스, 여자전류를 계산하여 PSIM의 변압기 특성 데이터로 입력하였다. PSIM 시뮬레이션 결과 M좌와 T좌 부하 평형시 1차와 2차측 전류의 평형을 확인할 수 있었으며, 2차측 지락과 부하 불평형시 전류를 예측할 수 있었다.

참고문헌

1. 조성돈, “EMTP를 위한 Scott변압기 모델링”, 대한전기학회 학술대회 논문집, 2005.
2. 정호성, 한문섭, 박영, 김형철, “차량기지의 전압불평형 감소를 위한 급전변압기 결선방식 해석”, 대한전기학회 학술대회 논문집, 2010
3. 김경만, “PSIM 시뮬레이션으로 해석하는 전력전자공학”, 태영문화사, 2006.
4. Colonel William T. McLyman, "Transformer and Inductor Design Handbook", Marcel Dekker, 2004.
5. 강인권, “전기철도 시스템 공학”, 성안당, pp. 119-144, 2002