

EMTP를 위한 Scott변압기 모델링

조 성 돈
삼성물산 플랜트기술팀

Scott Transformer Modeling for EMTP

Sung Don Cho
Samsung Engineering and Construction

Abstract - Scott 결선 변압기는 3상전원에서 단상부하를 공급해야하는 계통에서 많이 사용되고 있다. 특히 전기철도가 이에 해당되며 국내에서는 전기철도의 확장으로 Scott변압기가 154kV급의 송전계통에 연계되어 설치 운전되고 있다. Scott변압기의 특성상 단상인 부하측 또는 3상인 전원측에서 사고 발생시 각상에 흐르는 불평형 사고전류의 예측이 어려워 관련기기의 선정과 각종 보호계전기의 정정이 쉽지 않았으며 과도현상 해석도 쉽지 않았다. ATP(Alternative Transient Program)는 전력계통의 과도현상뿐만 아니라 단락 및 지락과 같은 정상상태 해석 및 고조파 분석도 가능하며 그래픽 유저 인터페이스를 위한 ATPDraw도 개발되어 데이터 입력과 사용법이 보다 간편하게 되었으며, 출력파형을 위한 PlotXY도 개발되어 계산결과를 다양한 형태의 그래프로 출력할 수 있게 되었다. 무엇보다도 User Group에 가입하면 무료로 모든 프로그램을 사용할수 있는 장점도 있다. 본고에서는 ATP를 사용하여 Scott변압기의 모델링과 이를 통한 단락 및 지락 사고 등의 해석 사례를 소개하였다.

전압에서의 여자전류를 측정할 필요가 있다. 2차측(55KV측)에 3상 전압을 V결선으로 인가하여 여자전류와 무부하손을 측정하기도 하나 이런 경우 M좌와 T좌권선 각각의 철심 특성 데이터를 구할수 없다.

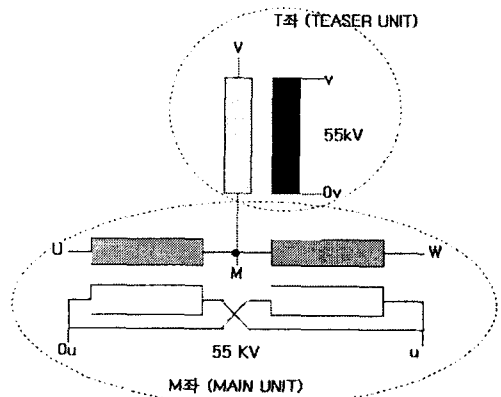


그림1. Scott변압기 내부결선도

1. 서 론

전력용 3상전원에서 용량이 큰 단상부하에만 전원을 공급하게 되면 3상전원은 부하 불평형이 되므로 이를 해소하기 위해 단상변압기 2대를 사용해서 3상 전원을 2상으로 변환하여 3상 전원을 평형이 되도록 하는데 이 방식이 Scott결선 방식이다. 이 결선 방식은 그림 1과 같이 2개의 단상변압기를 사용하는데 M좌 변압기는 1차 권선 중심점에서 단자를 인출하고 이 단자와 T좌 변압기 1차권선의 한쪽 단자와 연결하며 T좌 변압기의 1차 권선은 권수의 $\sqrt{3}/2$ 즉 0.866되는 지점에 단자를 만든다. 이렇게 해서 M좌와 T좌 변압기의 1차 단자 U,V,W를 3상전원의 R,S,T에 접속하고 가압하면 2차측 권선에는 M좌와 T좌 변압기의 1차 측 권선에 대응하는 90도 위상차의 2상의 단상전압이 유기된다. 예로 들면 변압기 1차 측에 3상 154kV의 전압을 가압하면 2차 측의 M좌와 T좌 각각에 90도 위상차의 55kV의 전압이 발생한다. Scott결선변압기는 그림2-3과 같이 M좌와 T좌의 권선을 각각 별개의 철심에 감아서 동일 탭크에 수용하는 2 철심형이 많이 사용되고 있다.

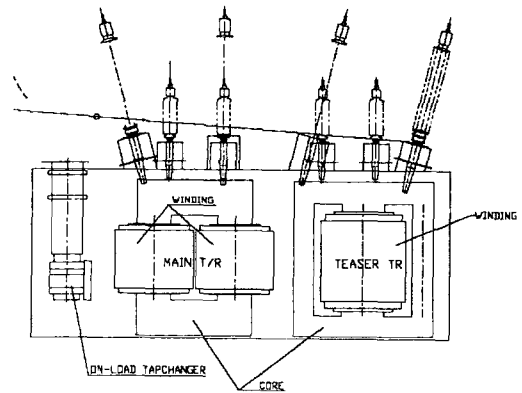


그림2. Scott변압기 외형도(측면)

2. 변압기 특성 데이터

변압기의 특성 데이터는 일반적으로 변압기 시험 성적서(Factory test reports)에서 얻을 수 있다. 시험 성적서에는 표1과 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 무부하 손을 측정하고 있다. 그러나 과전압 현상을 분석하기 위하여 변압기 철심의 포화 특성을 보다 정확하게 하기 위해서는 120% 또는 그 이상의

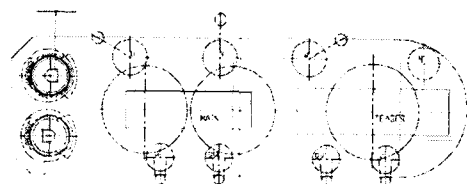


그림3. Scott변압기 외형도(상부)

단락시험(Short-Circuit Test)으로는 M좌, T좌 2차 모두 단락한 상태에서 1차에서 3상전압을 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 등이 있다.

그러나 M좌의 경우 권선이 3개로 나누어져 있으므로 완벽한 모의를 위해서는 최소 3개의 단락시험이 필요하다. 즉 앞에서 언급한 시험에 M좌 2차만 단락한 상태에서 M좌 1차의 S와 U단자에 단상전압을 인가하는 시험이 추가되어야 한다. 만약 시험에 의한 자료를 구하지 못하는 경우 (식 1)의 약식[2]에 의해 임피던스(X'')와 부하손(C'')를 추정할 수 있으나 정확한 값은 아니다. (X, X', C, C' 는 표1참조)

$$X'' = X' + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot X$$

$$C'' = C + \frac{1}{3} \cdot C \quad \dots\dots\dots(\text{식}1)$$

자화전류(I_m)는 (식2)와 같이 여자전류(I_{exc})로부터 저항성 분인 철손전류(I_c)를 제거함으로써 얻을 수 있다. 철심의 포화곡선을 위한 I -peak and I -peak는 I_{rms} - V_{rms} 데이터로부터 ATP의 SATURA subroutine을 이용하여 구할 수 있다.

$$I_m = \sqrt{I_{exc}^2 - I_c^2} \quad \dots\dots\dots(\text{식}2)$$

표 1. Transformer Factory Test Data

Scott Transformer 154000 Grd.Y/5500V-단상/55000V-단상 M좌 15/20MVA, T좌 15/20MVA @ONAN/ONAF		
	정격전압	정격전류
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% (X') @ 20MVA	70.151 kW (C') @20MVA
T좌 2차만 단락	9.093% @ 20MVA	58.535 kW @20MVA
U+M좌 M단자에 인가 M좌, T좌 2차 모두 개방	6.960% (X') @ 11.55MVA	41.132kW (C') @11.55MVA

3. 변압기 모델링

본고에서는 Scott변압기의 모델링을 위해서 2개의 BCTRAN 변압기 모델을 사용하였다. BCTRAN 변압기 모델은 단상과 3상, 2권선과 3권선, 단권변압기 등에 대한 모의가 가능하며 입력데이터는 대부분 변압기의 시험 성적서에서 입수가 가능하다는 장점을 갖고 있다.[1, 3] 그림 4는 ATPDraw에서 2개의 BCTRAN 모듈을 사용하여 Scott변압기를 모델링한 것을 보여주고 있다. 여기서

M좌는 3권선변압기로 T좌는 2권선변압기로 모의하였다. 그림 5는 BCTRAN 모듈에서 M좌 권선의 단락시험 데이터를 입력한 예를 보여 주고 있으며 그림 6는 M좌 권선의 무부하시험 데이터를 입력한 예를 보여주고 있다. T좌 권선도 동일한 방식으로 별개의 BCTRAN 모듈에서 단락시험 데이터와 무부하시험 데이터를 각각 입력하면 된다.

원래 ATP의 BCTRAN 모듈은 철심의 포화특성이 없는 변압기 모델이다. 따라서, ATPDraw의 BCTRAN 모듈은 비선형 인덕턴스인 type 98 inductance를 변압기 단자에 추가하여 포화특성을 구현하고 있다. BCTRAN 모듈은 변압기 여자 손실과 여자전류 시험자료를 입력하면 type 98 비선형 인덕턴스의 쇄교자속/전류를 자동으로 계산하므로 별도로 SATURA subroutine을 실행하지 않아도 되며 이를 그래픽으로 보여주는 View기능도 갖고 있다. 또한 BCTRAN 모듈은 ATP의 BCTRAN 루틴을 위한 Data 파일(.atp)과 BCTRAN 루틴에 의한 .pch 파일의 생성, 그리고 ATPDraw의 최종 데이터 파일(.atp)에 이를 포함하는 과정까지 자동으로 수행한다.

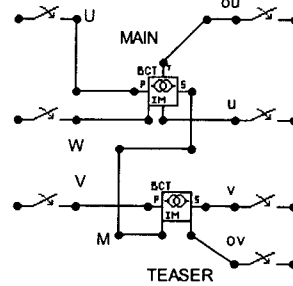


그림 4. ATPDraw에서 2개의 BCTRAN 모듈을 사용하여 Scott변압기를 모델링한 예

Structure: Number of phases [1], Number of windings [3], Test frequency [Hz] [60], AR Output [checked], Auto-add nonlinearities [checked].

Ratings: HV Voltage [kV] [154], LV Voltage [kV] [77], TV Voltage [kV] [55], Power [MVA] [20], Connections [A] [A] [A].

Factory tests: Open circuit | Short circuit |

positive sequence			
	Imp. [%]	Pow. [MVA]	Loss [KW]
HV-LV	6.96	11.55	41.132
HV-TV	13.189	20	70.151
LV-TV	14.2	11.55	64.5

Order: [0] Label: [MAIN] Hide

그림 5. BCTRAN 모듈에서 M좌 권선 단락시험 데이터 입력

Factory tests: Open circuit | Short circuit |

Performed at [HV] Connect at [HV]

positive sequence		
Volt [%]	Cur [%]	Loss [KW]
100	0.206	16.447
110	0.374	22.02

Positive core magnetization: Linear internal, External Lm, External Lm & Rm, Rm, Lm-rms, Lm-flux

그림 6. BCTRAN 모듈에서 M좌권선 무부하시험 데이터 입력

4. 모의 계산 결과

Scott변압기의 모델링이 적절하였는지에 대한 확인작업은 변압기 시험성적서에 나와 있는 시험조건과 동일한 조건에서 시험치와 같은 값을 얻을 수 있는 가이다. 표1에 있는 단락시험과 무부하시험 조건들을 각각 모의 계산한 결과 시험치와 같은 값을 얻을 수 있었다. 따라서 Scott변압기의 모델링이 적절하다고 볼 수 있다. 이러한 Scott변압기의 모델을 이용하여 T좌 2차에서 지락사고를 모의 계산한 결과는 그림 7~8과 같고, M좌 2차에서 지락사고를 모의 계산한 결과는 그림 9~10과 같다. 그리고 M좌 과부하시 1차측 전류는 그림 11, 110% 전압에서 변압기 무부하 전류 파형과 고조파비율은 그림 12~13, 154kV 차단기 투입에 의한 변압기 돌입전류 파형과 고조파비율은 그림 14~15와 같다.

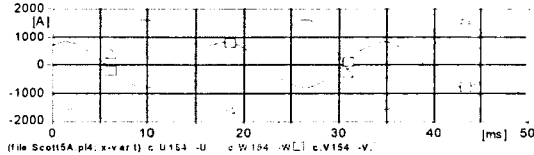


그림 7. T좌 2차에서 지락시 1차측 전류

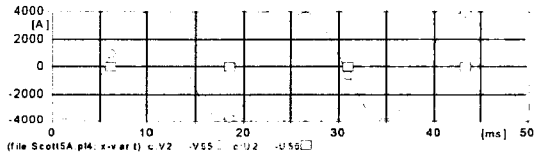


그림 8. T좌 2차에서 지락시 2차측 전류

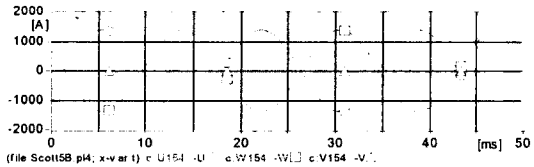


그림 9. M좌 2차에서 지락시 1차측 전류

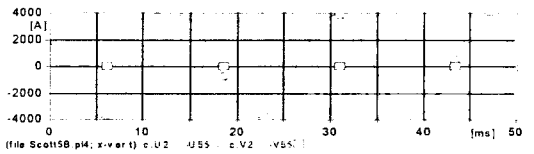


그림 10. M좌 2차에서 지락시 2차측 전류

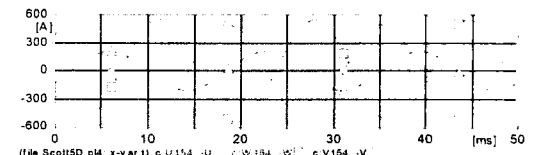


그림 11. M좌 과부하시 1차측 전류

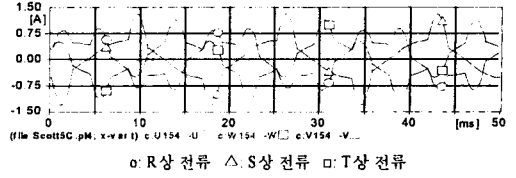


그림 12. 110% 전압에서 변압기 무부하 전류 파형

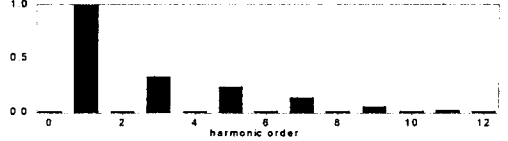


그림 13. 변압기 무부하 전류의 고조파 분석

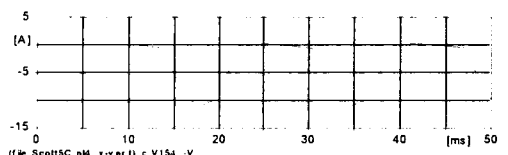


그림 14. 1차측 차단기 투입시 변압기 돌입전류

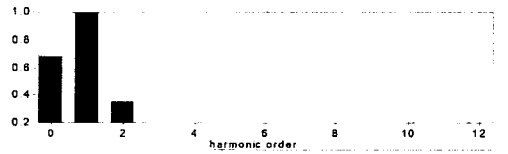


그림 15. 변압기 돌입전류의 고조파 분석

5. 결 론

모의계산결과는 모델링의 정확성과 입력데이터의 정확성에 의존한다고 해도 과언이 아니다. 지금까지 ATP와 ATPDraw를 위한 Scott변압기의 모델링 방법과 ATPDraw에서 데이터입력 방법과 이를 통한 단락 및 지락 사고 등의 해석 사례를 소개하였다. 변압기 시험성적서에 나와 있는 시험조건과 동일한 단락시험과 무부하시험 조건들을 각각 모의계산한 결과 시험치와 같은 값을 얻을 수 있었다. 따라서 2개의 BCTRAN 변압기 모델을 사용하여 구현한 Scott변압기의 모델링이 적절하다고 볼 수 있다.

단락시험시 M좌의 경우 권선이 3개로 나누어져 있으므로 완벽한 모의를 위해서는 최소 3개의 단락시험이 필요하다. 따라서 일반적으로 잘 시험하지 않는 M좌 2차만 단락한 상태에서 M좌 1차의 S와 U(또는 W)단자에 단상전압을 인가하는 시험이 반드시 필요하다.

[참 고 문 헌]

- [1] SINTEF, ATPDraw Users' Manual
- [2] M. J. Heathcote, The J&P Transformer Book - 12th Edition, Newnes Ltd., 1998.
- [3] H. W. Dommel, EMTP Theory book, Microtran Power System Analysis Corporation, Vancouver, British Columbia, May 1992
- [4] Modeling and Analysis of System Transients Using Digital Programs, IEEE PES Special Publication TP-133-0