

투입전류 제한을 위한 무부하 변압기의 개폐제어방식

이우영, 박경엽, 정진교, 김희진*, 박순규**
 한국전기연구원, *(주)비츠로테크, **한국전력공사 중앙교육원

Controlled Switching Method to Limit the Inrush Current for Unloaded Transformer

W.Y. Lee, K.Y. Park, J.K. Chong, H.J. Kim*, S.K. Park**
 Korea Electrotechnology Research Institute, *Vitzrotech Co. Ltd., **KEPCO CEI

Abstract - In this paper the method to limit inrush currents for unloaded transformers is proposed by controlling the opening instant in order to predetermine the residual flux. For the purpose of verifying the performance of the proposed method the test circuit with a single phase transformer is established and the effect of the controlled method is studied. With the basis of the obtained results the controlled method for three phase transformers with a wye-delta winding is also proposed. The analysis studies using EMTP(Electro-Magnetic Transient Program) are carried out in order to reveal its effectiveness.

1. 서 론

전력계통에서 차단기의 개폐동작에 따른 전압과 전류의 과도현상은 계통의 보호와 운영의 신뢰성 및 기기의 열화와 이에 따른 전기적 수명단축 등 여러 가지 문제들을 발생시키게 됨으로 이의 억제를 위한 다양한 방안들이 고안되고 있으며 그 중 개폐제어 차단방식이 최근 들어 많은 관심의 대상이 되고 있다. 개폐제어 방안의 적용이 수행되고 있는 분야들은 콘덴서 뱅크의 투입과 무부하 변압기의 투입 그리고 분류 리액터의 개폐와 송전선로의 투입 등 다양한 대상들이 있으며 현재까지는 변압기를 적용대상으로 하는 경우가 가장 많은 것으로 보고되고 있다.[1]

지금까지 개폐제어 방식에 의한 변압기의 과도 투입전류 억제에는 변압기 코아 내의 잔류자속 영향을 고려하지 않은 상태로 적용하고 있기 때문에 최적의 개폐제어 효과를 얻지 못하고 있는 실정이다. 따라서 이 분야에서는 잔류자속을 고려한 개폐제어 방안을 마련하기 위하여 많은 노력들이 계속되고 있으나 운용중인 변압기에서 잔류자속의 직접적인 측정이 장애적 요소로 대두되고 있는 실정이다.

본 논문에서는 변압기에 전원을 투입하기 전 선행된 개극동작에서 여자전류 차단시점이 코아에 잔류되는 자속의 극성과 크기에 영향을 주게되는 현상으로부터 잔류자속을 간접적으로 추정하고 이를 바탕으로 투입시점을 설정하여 투입전류를 억제하는 방안을 제안하였으며, 단상변압기에서의 실험과 EMTP를 통한 해석 결과들로부터 제안한 방식의 성능을 확인하였다.

2. 무부하 변압기 개폐제어방식

변압기 코아의 잔류자속이 영인 것으로 가정하는 경우 투입전류 제한을 위한 적절한 투입시점 선정방안은 선행된 연구들에 의해 이미 제시된 바가 있고[2] 현재 세계적으로 사용되고 있는 무부하 변압기의 개폐전략은 어느 이를 토대로 하고 있다. 이러한 투입전략 방식은 어느

정도 투입전류를 억제하는 효과는 있는 것으로 보고되고 있으나 변압기 코아의 잔류자속이 고려되지 않음으로 인해 최적의 전략이라 할 수는 없다. 따라서 최적의 투입시점을 이루기 위해서는 잔류자속의 영향을 고려한 방안들이 요구되며 급속투입(rapid closing), 동시투입(simultaneous closing) 그리고 지연투입(delayed closing) 전략 등의 형태로 이러한 요구들을 충족시킬 수 있는 방안들이 관련연구들을 통하여 최근 제시되고 있다.[3] 그러나 잔류자속에 대한 정보가 확보된 가정 하에 적용 가능한 이러한 방법들은 변압기 코아의 잔류자속 측정이 용이하지 않은 상황에서는 실제 도입이 쉽지 않다. 이러한 문제 해결을 위해 선행된 차단시점과 뒤따르는 투입시점과의 관계를 통한 간접적 방법의 잔류자속 관련 정보취득 방안을 잔류자속의 직접측정의 어려움을 해소할 수 있는 방안으로 선정하고 간단한 단상변압기의 투입전류 제한을 실험적 방법으로 먼저 확인하였다. 그리고 제안된 방식의 기본 개념은 그림 1과 같은 변압기 코아의 히스테리시스 특성과 이에 따른 전압, 자속 그리고 전류신호의 관계로부터 나타내어질 수 있다.

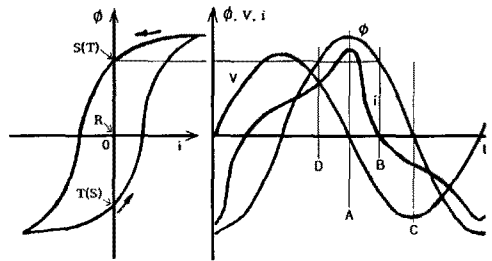


그림 1 변압기 코아의 히스테리시스 특성과 전압, 자속 및 전류의 관계

즉 전류의 영점 교차점(B)이 코아의 히스테리시스 특성으로 인해 자속의 영점 교차점(C)에서 전압의 영점 교차점(A)으로 이동됨으로 전류 차단 시 잔류자속이 존재하게 되며 전류제단 특성을 가지는 차단기의 경우 전류 차단 시점의 위상에 따라 잔류자속의 극성과 크기를 추정할 수 있음을 알 수 있기 때문이다.

잔류자속은 양의 부호 값을 가진 상태에서 예상자속이 음의 부호를 띄게되는 시점에서 투입이 이루어지게 되면 투입 시의 과도자속(transient flux)이 코아의 자속포화 영역으로 들어가게 되어 과도한 투입전류가 흐르게 되기 때문에 잔류자속은 투입시점을 설정하는데 중요한 요소가 된다. 이러한 사실은 투입직전에 선행되는 변압기 여자전류 차단과정을 통하여 간접적인 방법으로 추정되는 잔류자속의 정보 이용방안을 제안할 수 있게 한다.

그리고 삼상 변압기의 경우에는 여자전류가 차단되는 상의 동작 순서를 편의상 R-T-S상으로 가정하면 차단시의 전류 기술기에 따라 R상은 (+), T상은 (-) 그리고 S상은 (+)의 기술기를 가지는 경우와 각 상이 이와 반대

인 기율기 극성을 가지게 되는 경우의 두 가지가 존재하는데 각각의 경우에 대한 잔류자속은 그림 1의 히스테리시스 특성에서 표시된 잔류자속 형태(그림에서 괄호 안은 후자의 기율기 극성에 해당) 나타나게 된다.

차단과정을 통해 형성된 변압기 코아의 잔류자속과 동일한 극성의 유사한 크기 값으로 예상자속(prospective flux)이 주어지도록 투입시점을 설정하면 과도한 투입전류를 억제할 수 있게된다.

2.1 단상 변압기의 여자전류 개폐제어

선행된 여자전류 차단시점으로 인한 코아의 잔류자속이 변압기 전원투입 시 발생하는 돌입전류의 크기에 미치는 영향을 알아보기 위해 단상변압기를 사용하여 상간 간섭이 배제된 간단한 실험회로를 구성하였다. 변압기의 여자전류는 수 A 혹은 그 이하의 아주 작은 크기의 전류로 사용되는 차단기의 차단특성에 따라 전류제한 현상으로 인해 임의의 시점에서 차단되어지는 경우가 있으며 또 다른 경우는 전류영점에서 차단되는 경우도 있을 수 있다. 후자의 경우는 항상 인가전원을 기준으로 일정한 위상각에서 차단되기 때문에 차단기의 개극시점은 전류제한상의 순서를 결정하는 기준으로 제어되며 이와 함께 코아의 히스테리시스 특성으로 주어지는 전류 영점 교차점과 전압위상각의 관계를 파악하는 것이 필요하게된다. 전자와 같은 전류제한현상이 있는 차단기에서는 개극명령이 주어지는 시점에 따라 임의의 시점에서 여자전류가 차단될 수 있기 때문에 특정 차단시점을 얻기 위해서는 적절한 개극위상 제어기능이 필요하게된다.

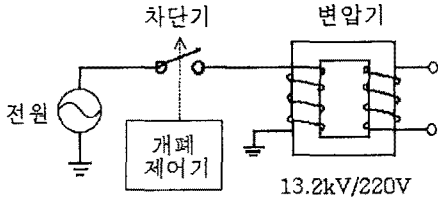
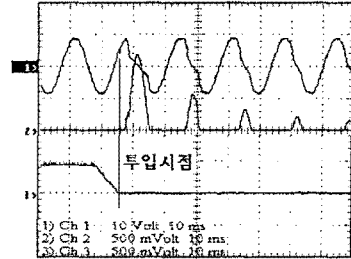


그림 2 단상변압기 여자전류 개폐시험회로

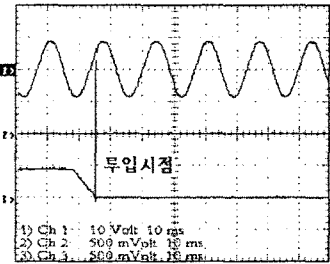
그림 2는 13.2kV/220V 주상변압기와 진공차단기(24kV 25kA VCB)를 사용한 단상변압기 여자전류 개폐시험회로를 나타낸 것으로 개폐제어기를 통해 진공차단기의 접점 개폐시점을 제어하여 변압기 투입시의 돌입전류의 제한 특성을 알아보기 위해 구성하였다. 그림 3은 구성된 회로에서 변압기 개폐시험결과를 나타낸 것으로 동일한 투입시점에서 선행 차단시점이 잔류자속이 (-) max. 값을 가지는 0° 와 (+) max. 값을 가지는 180° 에서 이루어진 경우에 대하여 측정된 것이다. 그림 3의 (a)는 변압기 투입전류(채널 2)가 크게 나타나는 반면 (b)의 경우는 과도상태의 투입전류는 없고 정상 상태의 여자전류만 나타나게됨을 알 수 있다. 동일한 측정 스케일에서는 정상 여자전류는 과도 투입전류에 비해 아주 작기 때문에 그림 3 b)에서는 전류가 나타나지 않는 것처럼 보인다. 따라서 변압기 코아의 잔류자속을 직접측정하지 않고서도 투입동작 전에 선행되는 차단시점의 제어를 통하여 변압기의 투입전류 제한이 가능함을 보여 주었다. 이러한 원리는 코아 및 권선의 구조에 따라 상간 상호 간섭이 존재하게 되는 삼상 변압기에서도 단상변압기의 경우보다 좀더 세심한 접근과정이 필요하겠지만 EMTP를 사용한 해석결과로 보아 동일하게 적용될 수 있을 것으로 보인다.

2.2 삼상 변압기의 여자전류 개폐제어

변압기는 코아와 권선의 구성에 따라 투입제어 시점이 달라지게 되는데 본 논문에서는 단상 코아로 구성된 wye-delta 권선 변압기에 대하여 투입전류 억제를 위한



(a) 선행 차단시점이 180° 인 경우



(b) 선행 차단시점이 0° 인 경우

그림 3 선행차단시점에 따른 투입전류의 크기 변화

- 채널 1 : 인가전원의 전압파형 (2kV/V)
- 채널 2 : 변압기 돌입전류 (10A/V)
- 채널 3 : 차단기 투입코일 전류 (10A/V)

개폐전략을 제안하고자 한다.

여기서도 마찬가지로 입력전원을 가상의 자속원으로 가정할 때의 예상자속(prospective flux)과 코아 내의 잔류자속(residual flux)이 동일한 크기와 부호를 가지게 되는 시점이 최적의 투입시점이 되지만 상간 자기적 간섭이 보다 복잡한 요인으로 작용하게 된다.

단상 코아의 wye-delta 권선 변압기에서는 가장 먼저 차단되는 상(여기서는 편의 상 R상으로 함)은 변압기 권선 전압에 아무런 영향을 미치지 않으며 두 번째 차단 상(T상)이 동작할 때 마지막 상에 인가되는 전압으로 먼저 차단된 두 상의 권선전압이 나타나게된다. 코아가 자속포화 및 히스테리시스 특성이 없는 이상적인 변압기의 경우 R 및 T상에는 S상의 권선전압과 비교하여 부호가 반대이고 크기가 1/2인 전압이 각각 나타나게된다. 하지만 자속포화 및 히스테리시스 특성이 있는 실제의 경우는 코아 내 자속의 크기에 따라 이차측 코일의 인덕턴스 값이 달라지게 되며 이 값에 따라 전압도 각각 달리 분배되어지게 된다.

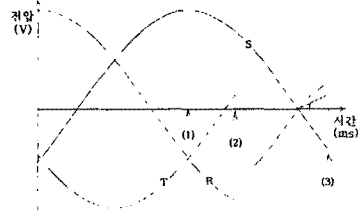


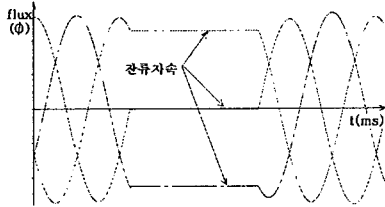
그림 4 변압기 여자전류 차단 시의 각 상 전압 파형

- (1): R상전류 차단시점
- (2): T상전류 차단시점
- (3): S상전류 차단시점

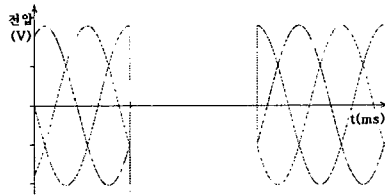
그림 4는 변압기 여자전류 차단시점의 각상 전압을 나타낸 것으로 시점 (1)에서 R상이 차단되었지만 권선전압에는 변화가 없으며 시점 (2)에서 T상이 차단되고 마지막 S상이 차단되는 시점 (3)까지 S상의 전압이 T상과 R

상에 인덕턴스의 값에 따라 분배되어지게 되는데 S상 전압의 대부분이 R상에 인가되고 T상에는 거의 전압이 인가되지 않음을 보여준다. 이는 T상 전류가 차단되는 시점 (2)에서 T상 자속은 음의 부호로 거의 포화영역에 다다라 있고 R상의 자속은 영점 부근에 있게 되므로 인덕턴스 값이 상대적으로 R상이 크기 때문이다. 이러한 형태로 차단과정이 이루어지면 코아의 잔류자속 형태는 R상은 영에 가깝고 S상 (+max.)에 그리고 T상은 (-max.)에 있게 되는 형태를 띄게 된다.[3]

그림 5, 6 그리고 7은 사용 차단기의 전류제한 특성 유무에 따른 개폐현상을 기준상의 투입 위상이 차단시의 위상과 동일한 경우와 180° 달라진 경우에 대하여 EMTP[4]를 이용하여 해석한 결과를 나타내었다. 해석과정에서 변압기의 히스테리시스 특성을 모델링 하기 위해서는 "type 96 hysteretical inductor"를 사용하였고 이 결과로부터 최적 투입시점은 차단시점의 위상각과 동일한 경우가 됨을 알 수 있다.

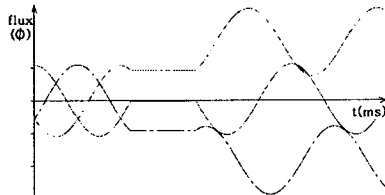


a) 각상 코아 내의 자속

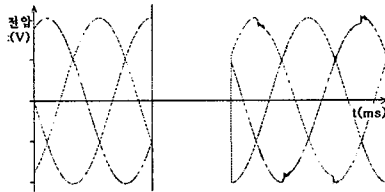


b) 각상의 인가전압

그림 5 차단 시와 동일한 위상지점에서의 투입결과(전류제한 특성이 있는 경우)

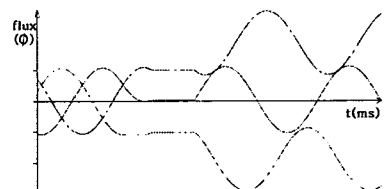


a) 각상 코아 내의 자속

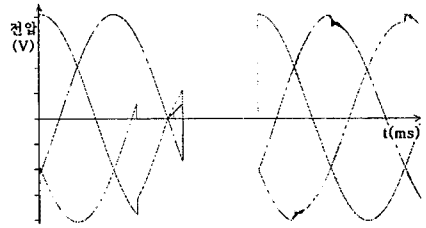


b) 각상의 인가전압

그림 6 차단 시와 180° 상이한 지점에서의 투입결과(전류제한 특성이 있는 경우)



a) 각상 코아 내의 자속



b) 각 상의 인가전압

그림 7 전류제한 특성이 없는 삼상 일괄 차단기의 개폐결과

3. 결 론

제한된 변압기 무부하 개폐제어 방식의 기본전략은 단상변압기를 통한 시험 결과로부터 확인된 바와 같이 개폐제어방식으로 차단 시의 잔류자속과 투입 시의 예상자속이 유사하도록 제어하여 줌으로 투입전류 억제효과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

그리고 제안된 개폐제어 형태는 대상 차단기의 전류제한 특성에 따라 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 전류제한 특성이 있는 차단기의 경우(진공차단기)
 - 차단기 개극명령에 따라 임의의 시점에서 여자전류가 차단되어지게 된다.
 - 잔류자속은 수행된 개극시점에 의해 결정되어진다.
 - 임의의 기준상의 전압 침투치 시점에서 차단하여 해당 상의 잔류자속 크기가 영이 되도록 설정한다.
 - 나머지 두상은 크기가 같고 극성이 서로 다른 잔류자속을 형성하게 된다.
 - 투입 시는 기준상의 투입시점이 차단시점과 동일한 위상각 상에서 이루어지도록 설정한다.

- 전류제한 특성이 없는 차단기의 경우
 - 차단기 개극시점이 변하더라도 전류영점의 일정한 시점에서 여자전류가 차단되어진다.
 - 잔류자속은 코아의 히스테리시스 특성으로 결정된다.

- 임의의 기준상(R)의 전류가 가장 먼저 차단되도록 해당상의 전압 영점직전에 개극시점을 설정한다.

- 투입 시는 차단시점의 기준상 전압 기울기가 (-)인 경우 투입시점은 기준상 전압의 (-)침투치에서 그리고 차단시점의 기준상 전압 기울기가 (+)인 경우 투입시점은 기준상 전압의 (+)침투치에서 이루어지도록 설정한다.

추후 삼상 변압기에 대해서도 제시된 개폐제어방식의 효율성을 확인하기 위해 수행된 EMTP의 해석결과를 바탕으로 실험적으로 검증해 나가고자 한다.

【참고문헌】

[1]CIGRE Task Force 13.00.1 of Study Committee 13, Controlled Switching: A State-of-the Art Survey Part I, Electra No.162 October 1995
 [2]CIGRE Working Group 13.07, Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers(2nd Part), Electra No.185, August 1999
 [3]J.H. Brunke, K.J. Frohlich, "Elimination of transformer Inrush Currents by Controlled Switching- Part I,II", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 16, No. 2, April 2001
 [4]EMTP, Electro-Magnetic Transient Program, Rule Book, ATP Salford Version, July, 1987