

삼상 변압기와 유도전동기에서의 전압 sag에 의한 돌입 전류 분석

김경남*, 안선주*, 정일엽**, 문승일*
 서울대학교*, 고려대학교**

Analysis of inrush current caused by voltage sag in three-phase transformer and induction motor

Keoung-Nam Kim*, Seon-Ju Ahn*, Il-Yop Jung**, Sung-Il Moon*
 Seoul National University*, Korea University**

Abstract - This paper studies the effects caused by symmetrical and unsymmetrical voltage sags on three-phase transformer and induction machine. The voltage sag on transformer and induction machine gives rise to inrush current. This inrush current makes sag more severe. These effects depend on many elements such as sag magnitude and duration, type of sag, and fault and recovery voltage instants.

1. 서 론

최근 전기에 대한 수요는 점차 증가되고 있다. 또한 수요량과 더불어 고품질 및 고신뢰도의 전력 공급이 요구되고 있다. 이러한 고품질, 고신뢰도의 전력 공급을 위한 여러 가지 전력품질 인덱스들이 존재한다. 그 중 전압 sag는 전압RMS값의 일시적인 감소 현상을 말하는 것으로 sag 발생 시 많은 전기 장비들의 오작동이 발생된다. 특히, 전압 sag로 인한 전압의 급격한 변동은 변압기와 유도기에 돌입전류를 발생 시킨다. 이처럼 변압기와 유도기에 의해 발생된 돌입전류는 sag의 회복이 늦어지는 post-sag를 유발한다. 따라서 sag 발생 후 sag의 회복이 늦어지는 post-sag의 발생이 유도기에 의한 영향인지, 변압기에 의한 영향인지 파악하는 것은 고품질, 고신뢰도의 전력 공급을 위한 중요한 과제중의 하나이다. 본 논문에서는 전압 sag에 의해 발생된 변압기와 유도기의 돌입전류가 어떤 차이를 가지는가를 살펴보기 위하여 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션을 이용하였다. 삼상 변압기와 유도전동기에서 3상 사고시 발생하는 돌입 전류에 대하여, 다음과 같은 변화를 주어 돌입전류의 크기 변화를 측정하였다. 첫째 돌입각도변화에 따른 돌입전류 변화, 둘째 사고 지속시간에 따른 돌입전류 변화, 셋째 sag 크기 변화, 넷째 부하크기 변화

위의 네 가지 변화에 따른 사고 전 전류 값에 비교한 돌입 전류의 변화를 비교, 분석하였다.

2. 본 론

2.1 돌입전류 발생원인

보통의 경우 변압기의 자화전류(magnetizing current)는 정격의 1-2% 정도로 매우 작다. 그러나 계통에 연결되거나 정상 가동 중 급격한 전압의 강하로 energizing을 할 때 변압기 코어에 과도 자속(transient flux)이 발생하며 일반적으로 이러한 과도 자속은 포화값(saturation value)을 넘어서게 된다. 이러한 순간에 그림 1과 같이 정격 전류의 수십 배에 달하는 자화 돌입전류(magnetizing inrush current)가 발생한다.

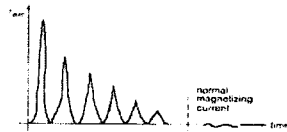


그림1 돌입전류의 특성

변압기의 철심이 자화 되지 않은 상태에서 일차권선에서 철심에서의 손실과 일차권선에서의 저항을 무시할 경우 전압 v 와 자속 Φ 는 다음식과 같다.

$$v_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

여기에 전압 v 를 계통의 전압 V 로 나타내면 아래 식과 같으며,

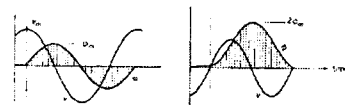
$$v_1 = \sqrt{2} V \sin \omega t = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (V \text{는 계통의 RMS값})$$

자속 쇄교수는 다음식과 같다.

$$\Phi = \frac{\sqrt{2} V}{N_1} \int_0^t \sin \omega t dt = \frac{\sqrt{2} V}{\omega N_1} (1 - \cos \omega t)$$

$$\Phi = -\Phi_m \cos \omega t + \Phi_m$$

따라서 변압기의 투입시점에 따라 즉, 투입할 시점에서의 계통 전압의 위상에 따라 돌입전류의 크기가 다르게 된다.



(a) 돌입각($\phi=90^\circ$) (b) 돌입각($\phi=0^\circ$)
 그림2 전압의 돌입각도에 따른 자속의 변화

그림2의 (a)와 같이 전압이 최대치에서 변압기가 켜졌을 경우 순시자속은 Φ_m 이 되고, (b)와 같이 전압이 0일 때 변압기가 켜졌을 경우 순시자속은 $2\Phi_m$ 이 된다.

그림3과 같이 잔류자속 Φ_r 이 존재할 경우는 더 심각한 경우가 발생하게 된다.

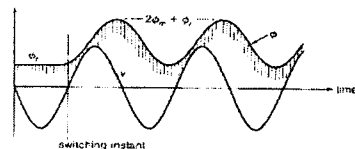


그림3 잔류자속 Φ_r 이 존재할 경우의 최대자속

최대 자속은 그림3과 같이 $(2\Phi_m + \Phi_r)$ 이 된다. 유도기의 경우도 변압기와 마찬가지로 유도기가 기동하거나 재가동하게 되면 정격 전류의 수배에 달하는 돌입전류가 유입되며 이러한 돌입전류는 유도기가 정상상태에 이를 때 까지 지속된다.

2.2 돌입전류 발생 모델

본 논문에서 sag로 인한 변압기와 유도기의 돌입전류 발생을 측정하기 위하여 PSCAD/EMTDC를 이용하였다. 변압기 모델은 삼상 Y-Y 결선, 20MVA, 22kV/6.6kV를 사용하였으며, 유도기는 권선형 유도 전동기 2.5MVA를 사용하였다.

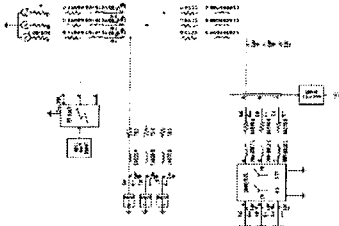


그림4 돌입전류 발생 변압기 EMTDC모델

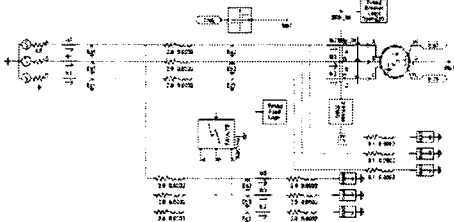


그림5 돌입전류 발생 유도기 EMTDC모델

위 그림4, 5와 같은 구성에서 각각 삼상 지락사고를 발생시켜 sag를 유발하였으며, 변압기와 유도기의 앞쪽에서 전류 값을 측정하였다.

2.3 사고 돌입 각도(Point-on-wave)에 따른 돌입전류 변화

sag 크기, sag 지속시간, 부하크기를 고정한 상태에서 시뮬레이션을 하였으며, 부하크기의 고정으로 사고 전 평균 전류는 일정한 값을 가지는 반면 돌입각도를 변화하였을 경우 각각의 돌입전류의 최고값은 그림6과 같이 변화하였다.

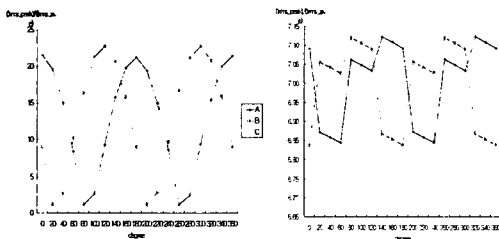


그림6 사고 전 전류값 대비 돌입각 변화에 따른 돌입전류 값의 변화 (좌: 변압기, 우: 유도기)
(sag mag 10%, dur' 5.5T)

그림6의 경우는 10% sag에 5.5주기의 sag 지속시간으로 고정했을 때이며, 그림과 같이 변압기의 경우는 돌입각도가 0°와 180°에서 최고값이, 90°에서 최소값을 가지는 정현파에 가까운 변화를 나타냈다. 즉, 전압이 0일 때 가장 큰 돌입 전류가 발생하였고, 전압이 가장 큰 값을 가질 때 가장 작은 돌입 전류가 발생 하였다. 반면 유도기의 경우는 일정한 규칙을 가지는 변화를 가지고 있으나 변압기와는 다른 변화 양상을 보여주고 있다. 유도기는 140° 정도에서 최고값을 가지며, 60°부근에서 최소값을 나타냈다. 또한 peak 값의 크기 변화는 변압기의 경우 돌입각에 따라 각 상의 사고전의 전류 값 보다 22-

1.2배의 크기 변화를 나타냈으며, 유도기의 경우는 각 상의 6-7배정도의 크기 변화를 나타내었다. 즉, 변압기의 돌입전류는 돌입각의 변화에 민감한 반면 유도기는 그렇지 않다는 사실을 알 수 있다.

2.4 사고 지속시간에 따른 돌입전류 변화

sag 및 부하크기와 돌입각도를 고정한 상태에서 변압기와 유도기에 0.5주기부터 10주기 까지 0.5주기 크기로 사고의 지속시간을 변화하였을 때 각상의 돌입전류의 변화는 아래 그림과 같다.

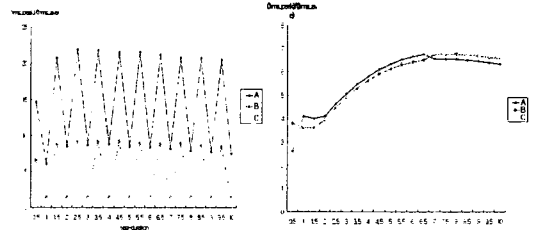


그림7 사고 전 전류값 대비 sag 지속시간 변화에 따른 돌입전류 값의 변화(0.5주기)(좌: 변압기, 우: 유도기)
(sag mag 10%, 돌입각 $\psi=0^\circ$)

위의 그림은 sag 크기는 10%, 돌입각도 $\psi=0^\circ$ 로 고정했을 때의 돌입전류 변화를 나타낸 것으로, 그림과 같이 변압기는 0.5주기의 사고 지속시간 변화에 대하여 n 배수의 주기 변화에 대하여는 거의 비슷한 결과를 나타

내었으나, $n + \frac{1}{2}$ 주기에서 n배수의 주기에 비하여 상대적으로 작은 값을 가지는 결과를 나타내었다.

유도기의 경우는 주기의 변화에 대하여 변압기에 비하여 상대적으로 선형적인 변화를 나타내었다고 할 수 있다. 위의 주기를 좀 더 세분화하여 2주기-4주기까지 변화시킨 결과는 그림8과 같다. 그림에서 보듯이 변압기는

한 주기를 기준으로 $n + \frac{1}{2}$ 주기의 주변에서는 높은 값을 n 주기의 주변에서는 낮은 값을 반복적으로 나타내고 있으며, 유도기의 경우는 사고 지속시간이 증가함에 따라 돌입전류가 선형적으로 증가하였다.

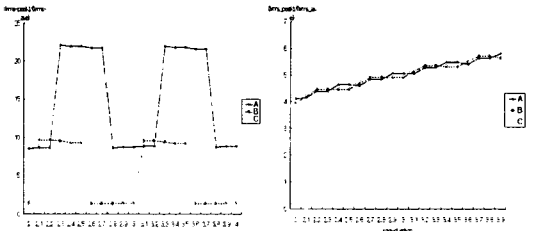


그림8 사고 전 전류값 대비 사고 지속시간 변화에 따른 돌입전류 값의 변화(0.1주기)(좌: 변압기, 우: 유도기)
(sag mag 10%, 돌입각 $\psi=0^\circ$)

2.5 sag 크기에 따른 돌입전류 변화

sag 지속시간, 돌입각도, 부하크기를 고정한 상태에서 sag 크기에 변화를 주어 돌입전류의 크기변화를 살펴보면 그림9와 같이 sag 크기의 감소에 따라 돌입전류의 크기도 작아지는데, 변압기의 돌입전류는 지수함수 형태로 감소하며, 유도기의 돌입전류는 선형적으로 감소하는 모습을 나타내었다.

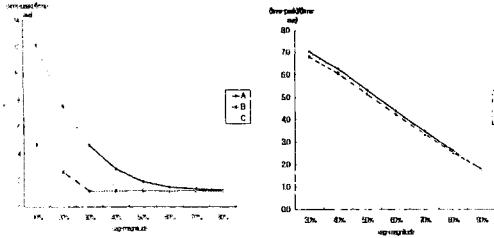


그림9 사고 전 전류값 대비 sag 크기 변화에 따른 돌입전류 값의 변화(좌: 변압기, 우: 유도기)
(dur' 5.5T, 돌입각 $\phi=0^\circ$)

결과적으로 sag크기에 대한 변압기의 반응이 좀 더 민감하다는 것을 알 수 있다.

2.6 부하 크기 변화에 따른 돌입전류 변화

sag의 크기, 사고 지속시간 및 돌입 각도를 고정한 상태에서 부하의 크기를 변화하였을 때의 변화를 살펴보면, 변압기의 경우 그림10의 (a),(b)는 R과 L이 증가함에 따라 돌입전류가 증가하는 것 보다 사고 전 전류 값의 증가가 더 큼에 따라 사고 전 전류 대비 돌입전류의 비율이 점차 낮아지는 것을 볼 수 있다. (c)에서는 R값이 증가함에 따라 사고 전 전류 값의 증가와 돌입 전류의 증가가 거의 비슷함을 알 수 있다. (d)의 경우는 R이 증가함에 따라 사고 전 전류 값만 증가하고, 돌입전류 값은 거의 변화가 없어 평균전류 대비 돌입전류의 비율이 점차 낮아지는 것을 볼 수 있다.

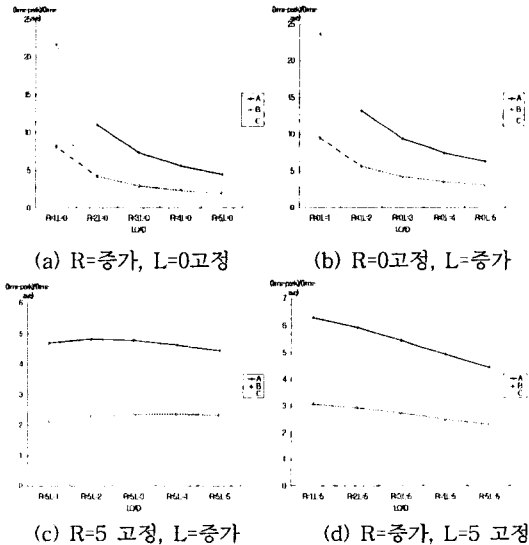


그림10 사고 전 전류 값 대비 부하크기 변화에 따른 돌입전류 값의 변화(변압기)
(sag mag' 10%, dur' 5.5T, 돌입각 $\phi=0^\circ$)

유도기의 경우도 그림11과 같이 부하의 크기가 증가함에 따라 사고 전 전류의 증가가 돌입전류의 증가보다 더 커지기 때문에 평균전류에 대한 돌입전류의 비가 부하가 커짐에 따라 작아진다.

이처럼 변압기와 유도기의 경우 부하의 크기 변화는 돌입전류의 크기 변화 보다는 사고 전 전류 값 변화에 큰 영향을 미치며 따라서 사고 전 전류에 비교한 돌입전류의 비를 작게 한다.

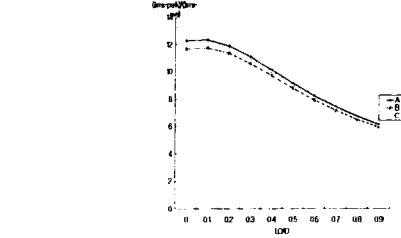


그림11 사고 전 전류 값 대비 부하크기 변화에 따른 돌입전류 값의 변화(유도기)
(sag mag' 10%, dur' 5.5T, 돌입각 $\phi=0^\circ$)

위의 결과를 종합적으로 살펴 볼 때 부하의 크기가 고정되어 있다고 가정한다면 시스템에서 변압기와 유도기의 용량에 따라서 돌입전류의 크기 및 사고 전 전류에 대비한 돌입전류의 비를 예상할 수 있으며, 이를 통하여 post-sag 발생시 sag의 지속시간 및 크기, 사고 돌입각도를 알면 발생된 돌입전류가 어떤 것에 의한 것인지 판별이 가능하리라 생각된다.

3. 결 론

본 논문에서는 변압기와 권선형 유도기의 돌입 전류의 특성에 대하여 비교, 분석하였다. 대체적으로 유도기에 비해 변압기가 사고 발생원 변화와 부하크기에 민감하였다. 위에서 살펴 본 돌입각 변화, sag크기 및 사고 지속시간 변화, 부하크기 변화에 따른 변압기와 유도기의 돌입 전류 발생 특성은 post-sag 발생 시 원인 판별을 위한 중요한 파라미터가 될 것으로 사료되며, 추후 변압기와 유도기의 고조파 발생 및 유효 전력의 변화를 비교할 경우 보다 정확한 post-sag 판별 방법을 찾을 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문의 연구는 산업자원부 지정 '전력신뢰도/품질 연구센터'에서의 재정적인 지원을 받아 진행되었습니다. 본 센터에는 경상대, 서울대, 숭실대, 전북대, 한양대의 교수님들과 대학원생들이 연구원으로 참여하고 있습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] Mulukutla, Sarma, Electric Machines : Steady-State Theory and Dynamic Performance. Western Publishing company, 1994.
- [2] M.H.J. Bollen, Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions. New Jersey, IEEE Press, 2000.
- [3] Joaquin Pedra, Luis Sainz, Felipe Corcoles and Luis Guasch, "Symmetrical and Unsymmetrical Voltage Sag Effects on Three-Phase Transformers", IEEE Transaction on Power Delivery, VOL.20. NO.2, pp1683-1691, April 2005.
- [4] L.Guasch, F.Corcoles and J.Pedra, "Effects of Voltage Sags on Three-phase Three-legged Transformers", IEEE Transaction on Power Delivery, pp571-576, 2002.
- [5] L.Guasch, F.Corcoles and J.Pedra, "Effects of Symmetrical and Unsymmetrical Voltage Sags on Induction Machines", IEEE Transaction on Power Delivery, VOL.19, NO.2, pp774-782, April 2004.
- [6] J.C. Gomez, M.M. Morcos, C. Reineri and G. Campetelli, "Induction Motor Behavior Under Short Interruptions and Voltage Sags", IEEE Power Engineering Review, pp11-15, February 2001.