

위상제어 정류기 게이트 펄스 신호를 위한 동기 신호 변압기에 관한 연구

김진성, 류호선, 이재도
한전 전력연구원

The Study of Synchronous Transformer to Generate Gate Pulse Signal in Phase Controlled Rectifier

Jin-Sung Kim, Ho-Sun Ryu, Jea-Do Lee
KEPRI

Abstract - 최근 전력연구원에서 화력 발전소에 설치한 위상 제어 정류기 (PCR : Phase Control Rectifier)에 설치된 동기 변압기 (Synchronous Transformer)의 절연 파괴에 의한 소손이 발생되어 발전소 운용에 신뢰성을 떨어뜨리고 있다. 본 논문에서는 800MW급 발전기용 다중화 정지형 여자시스템을 현장에 적용하여 설치, 운전중인 동기 변압기를 기준으로 1차측(고압측)이 절연 파괴 후 소손된 변압기의 설계규격과 1차측과 2차측의 권선배치, 고조파 영향, 권선 굵기에 따른 단락 용량 기타 변압기 제작 방법에 대한 전반적 기술을 검토한 결과를 기술하고자 한다.

1. 서 론

변압기 설계에는 이론적인 수식외에 많은 경험적인 기술이 필요하다. 설계계산의 기본이 되는 것은 어떤 크기의 자성체(철심)에 어떤 굵기에 전선을 몇 회 감을 것인가 하는 것이다. 이에 따라서 설계에는 반드시 기초 이론이 있는데, 즉 1차 전압, 2차 전압, 용량, 주파수이다. 이러한 사양치로부터 자성체의 단면적, 권선수, 권선의 굵기 등이 계산되어지고 계산된 수치에 경험적 수치가 더해지게 된다.

본 논문에서는 계산된 수치와 경험적 수치로 제작된 신호용 변압기의 설계치의 적합여부를 KS규격 및 IEEE 규격에 부합되는가를 확인하고 조사한다.

2. 본 론

2.1 동기 변압기 설계 사양

2.1.1 소손 변압기의 설계 사양

- 용량 (Capacity) : 1.0 KVA
- 1차 전압 (primary voltage) : 620V 3상
- 2차 전압 (second voltage) : 18V, 3상
- 주파수 (frequency) : 60Hz
- 결선 방법 : Δ-Δ

2.2 자성체와 전압비에 따른 Turn수 계산

800MW급 발전기용 다중화 정지형 여자시스템을 현장에 적용된 신호용 변압기는 포항 제철에서 제작된 코어를 사용하였다. 이 코어는 무방향성 전자강대의 Semi-processed (PNS Core)이며 두께가 0.5mm이며, 밀도 7.85g/cm³ 최소 자속 밀도는 1.72T이다. 무방향성 규소강판은 Si가 약 3%, 나머지가 철인 철규소합금으로 저급 트랜스, 전동기에 사용된다. 그러나 실제 제작된 변압기는 제작사에서 주는 자속밀도가 사용 환경이 다르기 때문에 실제 변압기는 데이터 북에 나오는 값에 반값을 적용하여 설계가 되고 있다. 이 코어의 자속밀도를 고려한 1차측의 Turn수를 고려하기 위해 식 1을 이용하여 Turn수를 계산한다.

$$N = E / (4.44fBS) \tag{1}$$

실제 변압기의 Turn 수는 1차가 2840번, 2차가 72번으로 제작되어 있다. 그러나 전압비로 환산하여 계산을 하면 1차가 620V, 2차가 18V로 전압비가 34.44이다. 그러

나 실제로 제작되는 변압기는 여유율을 가지고 설계하고 동손, 와류손 때문에 실제 권선비에 의한 전압비는 1차가 2840번, 2차가 72번으로 제작이 되어 있어 권선비가 39.44로 된다. 이는 1차측에 고조파의 영향이 많이 받는 부분이므로 리플에 의한 전식이 일어나게 되어 전선의 열화를 서서히 나타내게 하여 전선의 절연 파괴의 원인을 없애고자 하였다.

2.3 Inter-turn Stress

권선 간의 내압을 의미하며, 아래 [그림 1]와 같이 Transformer의 권선 양단에 정격 전압이 인가 될 때 권선 간에 나타나는 전압으로, 인접한 권선 간에 임의의 전압(Inter-turn Stress)을 인가하여 절연의 파괴가 발생하지 않아야 한다.

특히, 소형 저주파용 Transformer의 경우는 매우 가는 권선을 사용하며, 권회수를 많이 하기 때문에 Enamel Coating의 두께도 얇고, 권선 작업 도중 손상이 쉬우며, 구조상 다수의 층을 이루므로 표준 Inter-turn Stress 전압보다 높게 권선의 Enamel을 사용한다.

물론 Inter-turn Stress의 문제는 고주파용 변압기에서도 발생하며, 이 경우 권선 횡수는 적은 반면 권선 간의 전압은 높게 되며, 대부분의 경우 Inter-turn Stress의 문제는 선간의 단락이 즉시 발생하는 것이 아니라 서서히 절연이 열화되어 결국은 변압기의 소손을 초래하게 되며, 이러한 원인이 가장 일반적인 변압기의 소손 원인이 된다.

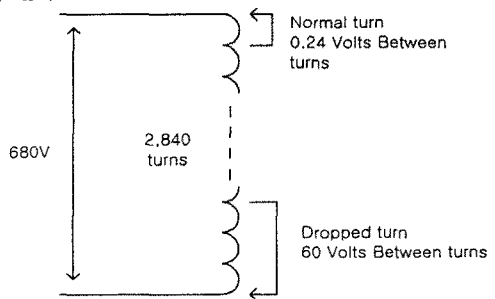


그림 1 변압기 권선간 내압크기

또한 실제로 전력연구원에서 제작 의뢰한 변압기는 그림 2과 같이 interturn stress를 고려하여 권선에 층마다 절연지로 절연을 하여 Turn voltage를 고려하여 제작을 했어야 하는데 그렇지 않게 제작을 하였기 때문에 변압기 소손이 발생되었다.

그림 3과 같이 권선 층마다 절연지로 절연을 하지 않을 경우 비정상적인 전압이 권선과 권선사이에 유기되어 권선 시작점과 끝점의 높은 전압이 유기되어 에나멜 전선의 자체 절연내력을 넘게 되어 변압기 소손이 발생되었다. 그러므로 신호용 변압기처럼 용량을 많이 필요하지 않아도 절연을 확보해야 한다.

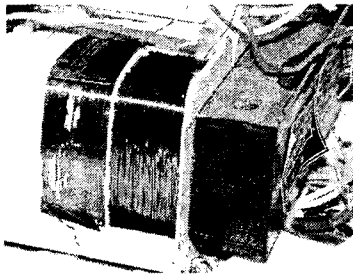


그림 2 소손된 변압기의 1차권선

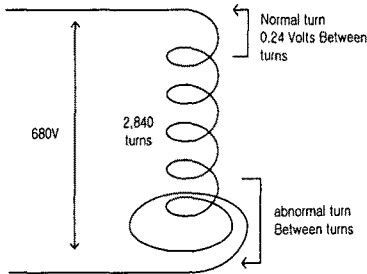


그림 3 변압기 권선간 불균형 내압

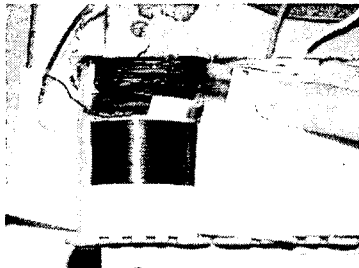


그림 4 소손 변압기 내부 사진

2.4 고조파에 따른 영향

본 연구원에서 제작한 신호용 동기 변압기는 위상 제어 정류기에서 발생하는 고조파가 1차측 권선에 많은 영향을 미치게 한다. 특히 위상제어 정류기의 입력으로 사용되는 대용량의 저전압 대전류를 공급하는 여자용 변압기는 전차수에 대한 고조파를 고려하여 와류손과 동손을 계산하여 제작이 된다. 그러나 신호용 동기 변압기는 여자용 변압기에 비해 적은 용량을 가지고 있고, 와류손과 동손을 알 수가 없어 설계시 적용이 어렵다.

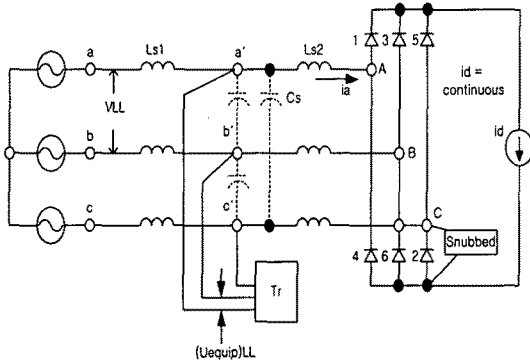


그림 5 3상 위상 제어 정류기 회로도

또한, 그림 5는 실제 PPT측 인덕턴스와 선로 Converter의 인덕턴스를 나타내는 실제적인 회로이다. Converter는 Line noise(전압 왜곡)를 일으키는 장치로서 그림 6과 같이 6개의 Commutation를 보여주고 있다.

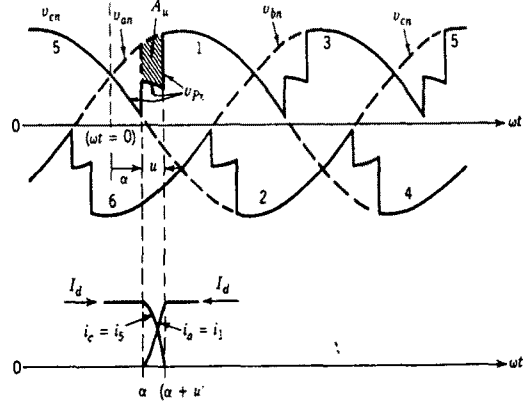


그림 6 A, B상간 Commutation

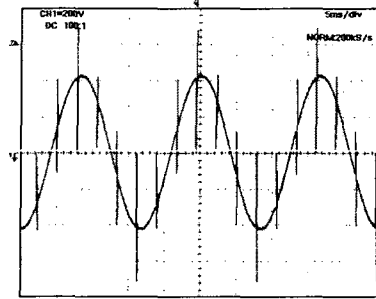


그림 7 실측된 1차측 전원전압 파형

이 Commutation으로 notch와 voltage distortion이 생겨 그림 7과 같이 전압의 왜곡이 생긴다. 그러나 이론적인 파형은 6개의 Commutation 동안에 이론적인 notch 전압 크기는

$$V_{deep} = \sqrt{2} V_{LL} \sin \alpha \quad (2)$$

이지만, 현장에 적용된 위상제어 정류기 경우는 이 식을 만족하지 못하고 있다. 이론적으로는 최대 전압까지 올라가지 않지만, 실제적인 왜곡 전압 파형은 그림 7과 같이 전압 크기가 2배가 되는 부분이 있다. (α 는 지연각)

실제로, notch의 깊이와 넓이는 ρ 배로 정해진다.

$$\rho = \frac{L_s}{L_{s1} + L_{s2}} \quad (4)$$

하지만 현장에 이 L_{s1} 과 L_{s2} 값을 변경한 것은 어려운 일이다. 그래서 notch의 영향을 적게 하기 위해서는 위상제어 정류기와 여자용 변압기 사이에 저차용 noise 필터를 설치하여야 한다.

저차용 noise 필터를 설계할 때는 표 1과 같이 측정된 고조파에 대해 고려하여 제작을 하여야 한다. 이때 고차 고조파는 그 크기가 적고 신호 전달용이기 때문에 신호에 가장 많은 영향을 주는 저차 고조파에 대해 고려하여 설계가 되어야 하며, 고차 고조파까지 필터를 하기에는 비용이 증가하므로 경제적인 측면에서 저차 필터를 설계하여야 한다.

표1 전원측에서 측정된 고조파

차수	Ih	Ih(pu)	차수	Ih	Ih(pu)
1	313.7	0.959327	29	6.5877	0.020146

5	62.1126	0.189947	31	7.2151	0.022065
7	44.8591	0.137184	35	4.3918	0.013431
11	25.7234	0.078665	37	5.3329	0.016309
13	23.8412	0.072909	41	3.4507	0.010553
17	14.7439	0.045088	43	3.7644	0.011512
19	15.3713	0.047007	47	2.5096	0.007675
23	9.7247	0.029739	49	2.5096	0.007675
25	10.6658	0.032617			

2.5 절연 저항

변압기 권선 작업시 사용하는 절연 Tape, 권선의 Enamel 및 변압기 Bobbin의 Plastic moulding등 절연을 위해서 사용하는 각 요소가 Corc로부터 이격됨으로 인해 절연저항이 존재하며, 절연 정도의 평가는 절연된 부위간에 직류전압을 인가하거나, 저항 값을 측정함으로써 평가 할 수 있다.

이때 인가전압의 크기는 통상 사용하는 정격전압보다 높은 값을 사용하며, 일반적으로 직류 200 - 500V 정도의 전압을 사용하며, 절연저항은 100 - 수천 [MΩ]정도가 일반적이다. 전력연구원에서 제작한 절연 저항은 300MΩ 이상을 가지고 있어 절연 내력은 충분하다.

2.6 내압 시험

변압기는 전기 회로간에 안전성을 유지해야 하므로, 이를 검증하기 위한 방법으로 고압 시험을 실시하여 절연파괴(Insulation Breakdown)가 발생하지 않아야 한다. 고압시험에 적용하는 전압은 500~5000[V] AC 가 사용된다. 이때 적용하는 시험규격은 표2의 규격을 적용하여 측정하였다. 시험에 적용한 전압은 4000Vac를 1분이상의 전압을 가하여 측정하였다.

표2 IEEE Std C57.18.10-1998

Exciter Rated Output Voltage Greater than 350 dc (Static Exciter)
2×rated output Volt + 2800Vac
2×rated input Volt + 10000Vac

2.7 동기신호 검출 변압기 개선 사항

- 용량 (Capacity) : 1.0 KVA
- 1차 전압 (primary voltage) : 620V 3상
- 2차 전압 (second voltage) : 18V, 3상
- 1차 전류 (primary current) : 18.5A
- 2차 전류 (second current) : 0.54A
- 주파수 (frequency) : 60Hz
- 결선 방법 : Δ-Δ

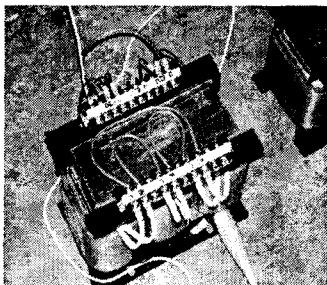


그림 8 개선된 동기 변압기

전력연구원에서는 [그림 8]에서처럼 1KVA 용량으로 상기의 문제점을 보완 개선해서 변압기를 다시 제작하였다. 이때 변압기의 일반 시험인 외형 치수 및 표시, 절연저항, 전압편차, 내전압, 전압 불평형도, 충전내 전압, 전압 변동률 시험을 실시하였다. 시험 결과는 다음

표3 에 기술되어 있다.

표 3. 보완된 동기 변압기 시험치

검사 항목	기 준	측 정 치	결 과
외관 및 구조	육안 검사	이상 없음	합격
전압비	1차	620V R T 623V S T 619V S R 625V	합격
	2차	18V R T 18.09V S T 17.96V S R 18.08V	합격
절연저항	1000V Megger 300MΩ이상	1차 접지 550MΩ 2차 접지 600MΩ 1차 2차 600MΩ	합격
절연내압	AC4000V 60Hz 1분간	1차 접지 4000V 2차 접지 4000V 1차 2차 4000V	합격

개선 보완 사항은 1차 권선의 중간 절연을 실시하고, 권선을 내 고압 절연 전선으로 교체하였으며 권선 절연을 에나멜로 처리하였으며 바니쉬 진공 함침을 2회 이상 실시하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 화력 발전소에 적용 설치된 동기 변압기의 신뢰성과 성능을 높여 향후 20년간 발전소에 무정지 연속 운전을 가능하도록 연구하는데 그 목적이 있다.

위상 제어 정류기용 동기 변압기를 설계할 때는 단순한 수식에 의한 설계보다는 여유율과 절연 파괴가 되지 않으면서 운전 가능하도록 설계가 되어야 한다. 특히 본 논문에서와 같은 변압기는 1차측에 고조파가 많이 발생하는 시스템에는 1차 권선에 전직을 일으킬 수 있으므로 충분한 여유율을 가지고 용량 설계가 되어야 한다. 또한 변압기 제작시 신호용 변압기라고 할지라도 권선의 Turn수가 많아지면 Turn voltage가 누적되어 절연지나 절연물을 권선층간에 넣지 않고 제작을 한다면 시간이 지나면서 권선의 절연 파괴의 원인이 된다. 만약 절연물을 넣지 않고 제작하게 된다면 권선의 시작점과 끝점이 연결되어 권선과 권선 사이에 높은 전압이 형성하게 되므로 절연 확보를 하여 신뢰성을 높여야 한다. 그러므로 변압기 제작시 권선간 절연 확보를 반드시 하여야 한다.

또한, 고조파의 유입으로 1차권선에는 전류의 평균치보다 더 큰 고조파 전류가 유입이 되어 권선의 용량을 넘어 한 주기마다 권선에 stress을 주게 되므로 이에 맞는 전선의 용량 선택도 반드시 필요하다.

[참 고 문 헌]

- [1] 노의철외 2명, "전력전자 공학", 문운당, 2판, 2000
- [2] 과학기술 정보연구소, "트랜스포머/인덕터 설계기술 및 응용기술", STⅡ 911169, 2002.4
- [3] KSC 6308 "전자기기용 소형전압 변압기" 1982
- [4] Moha, Undeland, Robbins"Power Electronics Converters, Applications and Design"
- [5] "IEEE Std Practices and Requirements for Semiconductor Power Rectifier Transformers" IEEE Std C57.18.10-1998
- [6] "IEEE Std for High Potential Test Requirements for Excitation System for Synchronous Machines", IEEE Std 421.3 1997
- [7] IEEE "IEEE Guide for Harmonic Control and Reactive Compensation of Static Power Converters," ANSI/IEEE Std 519 1981