태양광 계통연계형 하이브리드 변압기의 해석 및 성능시험

Analysis and Performance Test of Hybrid Transformer used in the Grid-Connected Photovoltaic Generation System

김 지 호* · 박 훈 양** · 손 진 근†
(Ji-Ho Kim · Hoon-Yang Park · Jin-Geun Shon)

Abstract - This paper concerns the development of the transformer that can reduce harmonics supplied to the system if the output of photovoltaic inverter in the photovoltaic system is grid-connected, and suggests that problems of harmonics and power factor degradation in the grid-connected photovoltaic system can be improved. In this study, the burden of increasing the investment in new facilities and securing their installation space due to harmonics has been substantially eased through the development of a hybrid transformer possessing unbalanced function and harmonics reduction function using zig-zag coils, and most of all, it is expected that the development of such high efficiency hybrid transformer possessing functions of transformation and reducing harmonics can improve the power quality as well as prevent damages caused by harmonics, leading to suppress unnecessary loss of electric power and thereby contribute to energy savings.

Key Words : Harmonics, Hybrid transformer, Photovoltaic system, Smart grid, Zig-zag winding

1. 서 론

최근 전력변환장치의 기술이 다양화되고 응용 범위가 확대됨에 따라 반도체 소자를 사용하는 스위칭 전원장치가 널리 보급되고 있다. 컨버터, 인버터와 같은 스위칭 전원장치는 고조파 발생의 주요 원인이 되고 배전선로의 부하에 위치한 스위칭 전원장치에 의해서 발생한 고조파는 계통에 연계되어 있는 타 부하계통에도 심각한 영향을 미치고 있다 [1-3].

고조파는 전원품질을 저하시키는 주요 원인이고 배전용 변압기에 큰 문제를 발생시키고 있다. 고조파가 증가할수록 변압기의 용량이 감소하고 또한 전원손실의 증가로 변압기의 용량이 감소하고 발열량이 증가하는 현상이 발생한다. 특히 변압기는 철심의 자화현상에 따라 소음이 발생하게 되고 철손과 동손의 증가에 따라 용량이 감소하게 된다. 변압기 용량의 감소와 발열 증가는 변압기의 수명저하로 이어질 가능성이 있다. 고조파로 인하여 발생하는 문제의 심각성으로 고조파 관리 기준이 제정되어 있고 배전계통 전압의 왜곡율을 제한하고 있다 [2, 4]. 앞으로 고조파 문제는 부하설비의 다양화, 전력변환장치의 사용증가에 따라 더 심각해 질 것으로 예상된다. 현재는 변압기의 상태를 모니터링하기 위한 장비로 온도 감시 장치만 부착되어 있지만 고조파 상황

을 실시간으로 감시할 수 있는 시스템의 필요성이 부각되고 있다.

최근 크게 이슈가 되고 있는 에너지 절약 산업 및 신재생 에너지 산업에서도 전력변환기술을 이용하고 있기 때문에 이와 같은 환경적 조건에서 발생된 고조파 전류는 계통 운영상 많은 문제를 일으킬 가능성이 크다. 따라서 고조파는 수용가 측에서 계통으로 유입되는 것이기 때문에 수용가 측에서 고조파를 제한해야 합리적이다.

본 기술개발은 태양광발전시스템의 태양광 인버터의 출력을 계통 연계할 경우 계통에 공급되는 고조파를 저감시킬 수 있는 변압기 개발에 관한 것으로서, 계통 연계형 태양광 발전시스템에서 고조파 및 역률 저하 문제를 개선시킬 수 있다.

그림 1 하이브리드 변압기를 적용한 태양광 발전 시스템의 계통연계도

Fig. 1 Hybrid transformer used in the grid-connected photovoltaic generation system

본 연구에서는 Zig-Zag 권선을 이용한 불평형 및 고조파 감쇄 기능을 갖는 하이브리드 변압기 개발을 통해 기존 변

† 교신저자 : 가천대학교 전기공학과 교수 · 공박

E-mail : shon@gachon.ac.kr

* (주)에너테크 기술연구소장 · 공박

** (주)에너테크 대표이사

접수일자 : 2014년 11월 17일

수정일자 : 2014년 11월 22일

최종완료 : 2014년 11월 24일

압기 방식에서 문제가 되고 있는 고조파로 인한 신규 설비 투자비 증가와 설치 공간 확보에 따른 부담을 크게 완화시켰고, 무엇보다도 변압기능과 고조파 감쇄기능을 갖는 고효율의 하이브리드 변압기 개발을 통해 고조파로 인한 피해예방은 물론 전력품질을 개선함으로써 불필요한 전력손실을 억제하여 에너지절약에도 일조할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 관련기술현황

2.1 기술개발동향

태양광발전용 인버터는 태양전지 어레이(array)로부터 발생된 직류전력을 상용주파수, 전압의 교류로 변환하여 전력계통에 연계함과 동시에 시스템의 직류, 교류 측을 보호한다. 태양광발전시스템에서는 인버터 부분에 절연변압기를 사용하여 태양전지 측의 직류 전력과 계통연계 측의 교류전력과의 혼축을 방지하는데 사용되고 있다. 절연변압기의 목적은 태양광발전시스템으로부터 전력계통에 직류성분이 유출되는 것을 방지하는 것과 상용계통으로부터 태양광발전시스템에 이상전위가 유입되는 것을 방지하기 위한 것이다[1, 4].

태양광발전시스템의 전력계통과의 절연방식에는 상용주파수변압기 절연방식과 고주파링크형 절연방식 그리고 무변압기형의 3종류가 있다. 상용주파수절연방식은 인버터의 교류출력부에 60Hz의 상용주파수 절연트랜스를 접속하는 것이며, 기술적으로 안정된 실적이 있는 회로로서 많은 인버터에 사용되고 있다[4].

고조파가 발생하는 전력시스템에서는 고조파 악영향을 감소시키기 위해 일반적으로 고조파 필터를 설치한다. 리액터, 콘덴서와 저항을 조합한 수동형 필터와 능동소자를 결합한 능동형 필터 두 가지로 구분된다. 수동형 고조파 필터는 특정 고조파를 흡수하는 반면, 특정 고조파 공진 조건이 발생하거나 공진 점이 이동하여 고조파가 증대되는 경우도 발생한다. 능동형 필터는 수동형 필터에 비하여 설치비용이 많이 드는 반면 효율적인 제어로 전기적 특성이 변동되는 비선형 전기설비에서 발생하는 고조파를 효율적으로 저감할 수 있다. 또한 고조파 공진 우려가 없으며 상대적으로 작은 용량으로 고조파를 저감할 수 있다[5, 6].

국내외적으로 변압기 기술개발은 고효율, 소음감소, 외형 축소 등에 방향을 정해놓고 있어서 변압기 설계기술에 대한 연구보다는 신소재 개발에 주력하고 있는 실정이다. 그러다 보니 자연적으로 변압기 설계기술은 상대적으로 뒤져 있었으며, 그에 비해 변압기 재료는 상당히 결실을 이루었다.

현재 고효율 변압기로 널리 알려진 아몰퍼스 변압기나 레이어코어(자구미세화강판) 변압기가 그 예이다. 두 변압기는 변압기의 철손과 동손을 줄이기 위해 신소재의 철심 재료를 채택한 것이다. 이러한 변압기는 철손과 동손의 감소효과는 기대할 수 있을지 모르나 고조파, 불평형에 의한 전력손실은 줄일 수 없어 효율성이 떨어진다. 또한 아몰퍼스 코어는 수입제품으로 고가로 경제성이 낮고 발열, 소음 등을 발생시키는 한계점을 드러내고 있다.

2.2 관련기술의 문제점

근래 신재생에너지의 보급 의무화로 태양광 발전설비가 각광을 받고 있다. 특히, 100kW 이상의 중대형 발전설비가 산업용 전기설비와 연계되는 경우가 많아지고 있는 실정이다. 따라서 태양광 발전설비를 연계시킬 경우 고조파 및 역률 저감에 대한 문제가 발생한다. 이러한 문제를 야기한 부분은 인버터 및 수용가(부하)에서 발생한다.

한전의 계통연계기술기준에서는 도입지점 및 용량에 의한 운전역률은 90%이상으로 규정하고 있으며 인버터 생산업체에서는 정격 출력 시 역률을 99% 정도로 제어하도록 만들어지고 있다. 무효전력을 출력해주는 능동필터 기능이 탑재되지만 유효전력의 출력을 유지하면서 무효전력까지 출력하려면 본래 용량보다 약 150% 이상의 출력을 갖는 인버터가 필요하게 된다.

태양광발전시스템은 인버터로 DC-AC 변환하는 과정에서 고조파가 발생하는데 계통의 허용량을 초과할 경우 접속되어 있는 다른 부하설비에 악영향을 초래할 수 있기 때문에 신재생에너지 전원에서 고조파를 제한한다. 한국전력의 연계기술기준에서 규정하고 있는 전압왜형률은 3% (66kV 이하), 1.5% (154kV 이상), 고조파전류의 왜형률(THD ; Total Harmonic Distribution)은 5% 이하로 규정하고 있다.

2.3 하이브리드 변압기

하이브리드 변압기란 고조파와 불평형 개선 기능을 갖는 다기능 변압기의 배전용 변압기를 의미한다. 즉, 기존의 변압기는 단순히 변압기의 기능만을 갖춘 설비이기 때문에 고조파 또는 불평형을 줄이기 위해서 반드시 별도의 전기설비를 추가로 설치해야만 했으나, 하이브리드 변압기는 Zig-Zag 권선을 통해 고조파와 불평형 감쇄 그리고 변압기능을 동시에 수행할 수 있으므로 별도의 전기설비를 둘 필요가 없다. 따라서 기존의 변압기 설비 투자방식에 비해 투자비용의 절감과 공간의 축소 그리고 전기설비의 효율을 개선시켜 에너지 절약은 물론 날로 증가하는 고조파에 의한 피해를 줄일 수 있다.

그림 2 변압기 설비 배치도 비교

Fig. 2 Comparison of transformer facility layouts

3. 계통연계형 태양광발전시스템 시뮬레이션

일반적인 배전용 변압기와 하이브리드 변압기를 태양광발전시스템에 설치하였을 때, 수용가에서 발생한 고조파가 미

치는 영향을 비교하였다. 우선 태양광발전시스템은 그림 3과 같이 6 leg 인버터의 동작 관련 프로그램 제어용 DLL 파일을 이용하여 인버터 운전 프로그램을 작성하였으며, 전원 계통에 두 가지의 변압기를 설치하여 각종 전기량을 측정하였다.

(a) 일반 변압기 설비의 시뮬레이션

(b) 하이브리드 변압기 설비의 시뮬레이션

그림 3 태양광발전시스템의 시뮬레이션 계통도

Fig. 3 Simulation of photovoltaic generation system

(a) 일반 변압기 파형 (b) 하이브리드 변압기 파형

그림 4 두 가지 변압기 설비의 시뮬레이션 결과

Fig. 4 Simulation results of the two types of transformer facility

시뮬레이션 과정은 부하의 고조파 전류가 상용 전원전류에 영향을 주는 것을 나타내었다. 그림 4(a)는 일반변압기를 적용한 설비의 시뮬레이션 결과이며, 그림 4(b)는 하이브리드 변압기를 적용한 설비의 시뮬레이션 결과이다. 일반변압기를 적용한 경우는 고조파 전류가 상용전원 전류에 영향을 주는 것을 나타냈으며, 하이브리드 변압기를 적용한 시뮬레이션 결과는 일반변압기를 사용했을 때보다 고조파 성분이 다수 제거된 것을 확인할 수 있었다.

그림 5는 일반변압기와 하이브리드 변압기를 적용하여 수용가에 고조파가 있는 경우 각각의 고조파 왜형률은 0.34와 0.23으로 시뮬레이션 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 태양광발전시스템 계통연계형 변압기로 하이브리드 변압기를 사용하였을 경우 약 33%의 고조파 저감을 확인할 수 있었으며, 이 결과를 바탕으로 부하에서 발생한 고조파는 상용전원에 영향을 주기 때문에 고조파 저감용 변압기가 필요함을 알 수 있었다.

(a) 일반 변압기 고조파 시뮬레이션

(b) 하이브리드 변압기 고조파 시뮬레이션

그림 5 두 가지 변압기 설비의 고조파 왜형률

Fig. 5 THD of the two types of transformer facility

4. 전원품질분석 장비를 이용한 현장실측

4.1 현장실측의 개요

연계형 분산전원이 전력계통의 전원품질에 미치는 영향을 분석하기 위하여 태양광 발전을 설치하여 상업 운전 중인 장소를 선정하여 전력계통과 분산형 전원이 연계된 공통접속점(PCC : Point of Common Coupling Assumption) 중 하이브리드 변압기 1차 측과 2차 측에 전원 품질분석 장치를 설치하여 전원품질요소에 영향을 주는 요소들을 측정하였다. 전원 품질분석 장비는 일본 HIOKI 사의 Power Quality Analyzer PW3198을 이용하여 전압, 전류, 주파수, 역률, 고조파 등 전원품질의 척도가 되는 요소들을 측정하고 HIOKI PQA-HiVIEW Pro 9624-50을 이용하여 분석하였다.

전력계통과 연계된 태양광 발전설비의 인버터의 교류전원 출력(측정지점)회로의 계통 연계형 변압기 1차 측 및 2차 측에서 전원품질분석 장비를 설치하여 주간의 태양광 발전

설비가 발전을 할 경우와 야간 또는 흐린 날에 발전을 하지 않을 경우의 전원품질요소를 측정하였고, 이 태양광 발전의 전원품질요소가 전력계통의 전원 품질에 미치는 영향을 분석하였다.

그림 6 태양광 발전설비의 전원품질요소 측정 위치

Fig. 6 Measured position of power quality factors of photovoltaic power generation facilities

전원품질 요소 측정 방법은 1회 24시간 측정을 원칙으로 1주일을 기준으로 측정하되 부하설비의 부하변동 및 태양의 일사량 변화에 의한 태양광 발전량 변화를 고려하였다. 측정개소별로 동일 기종의 전력분석기를 이용하여 동시간대 측정하여 측정 데이터의 오차를 줄여 신뢰도를 높였으며, 전원품질요소의 측정은 전압, 전류, 주파수, 역률, 고조파 등으로 구분하여 측정, 분석하였다.

설치된 600kWp BIPV(Building Integrated Photovoltaic System) 시스템은 건물 내의 변전실의 배전반을 통해 한전과 연계되어 있다. 이의 출력량 변화에 따른 전력품질을 측정하고 계통연계 기준과 비교 분석하였다. 그림 7과 같이 600kWp BIPV 시스템의 실시간 전력품질을 측정하기 위하여 시스템의 계통 연계형 하이브리드 변압기의 1차 측과 2차 측에 전력품질 측정기를 설치하여 이를 계측하였다.

(a) 변압기 1차 측

(b) 변압기 2차 측

그림 7 하이브리드 변압기 1차 측 및 2차 측의 전력품질 측정 광경

Fig. 7 The power quality measurement of the hybrid transformer primary side and the secondary side

4.2 현장 실측 결과분석

그림 8은 2013년 12월 측정한 600kWp BIPV 시스템의 계측 결과이다. 계측 사항은 U, V, W 상의 유효전력, 전압/전류 파형, 전압/전류 벡터도, 유효/무효/피상 전력, 역률, 전압과 전류의 THD이다.

전압 고조파의 경우는 계통 연계형 변압기의 1차 측과 2차 측 모두에서 태양광발전시스템의 운전여부와는 상관없이 일정한 값을 유지한다. 전류 고조파의 경우는 태양광 발전시스템이 운전하지 않아도 계통 연계형 변압기 1차 측과 2차 측 모두에서 일정량의 전류 고조파가 발생하고 있음을 알 수 있었다. 태양광 발전시스템 가동 시에는 계통 연계형 변압기 1·2차 측 모두에서 태양광 발전시스템에 투자되는 일조량 값에 매우 민감하게 변동함을 알 수 있었다. 또한 2차 측에서는 3차, 5차, 9차 고조파가 태양광 발전시스템의 가동과는 관계없이 높게 나타나는 경향이 보였으며, 이는 2차 측이 계통과 연계되어 있는 관계로 부하 단의 비선형 부하에 의해 발생된 전류 고조파가 유입된 것으로 판단된다. 이에 1차 측에도 영향을 미쳐 태양광 발전시스템이 가동되지 않았음에도 전류 고조파가 야기된 것으로 판단된다.

(a) 3상 전압, 전류 파형-1차측

(b) 3상 전압, 전류 파형-2차측

(c) 3상 전압, 전류 벡터-1차측

(d) 3상 전압, 전류 벡터-2차측

(e) U상 전압 고조파-1차측

(f) U상 전압 고조파-2차측

(g) V상 전압 고조파-1차측

(h) V상 전압 고조파-2차측

(i) W상 전압 고조파-1차측

(j) W상 전압 고조파-2차측

그림 8 600kWp BIPV 시스템의 3상 전압, 전류 고조파 경향 측정 결과

Fig. 8 Measurements of 3 phase voltage, current and harmonics trend in the 600kWp BIPV system

현장에 설치된 태양광 계통연계형 하이브리드 변압기 600kVA 시험품에 대한 고조파 저감 성능을 확인하기 위하여 9월부터 12월까지 약 3개월 간 전력분석기를 설치하여 고조파 경향을 측정하였다.

시험방법은 600kVA 태양광발전시스템에 설치된 하이브리드변압기의 1, 2차 측에 전력분석기를 설치하여 결과를 측정하였다. 저압권선(LV)과 고압권선(HV)에 기 설치되어 있는 계기용변압기(PT)와 변류기(CT) 라인에 전력분석기를 설치하여 1분 단위로 측정하여 태양광발전시스템 운영시간 동안 하이브리드변압기 입력 및 출력에서의 데이터를 비교하였다.

이중 날씨에 따라 일조량의 차이가 보이기 때문에 측정하는 기간동안 일조량이 가장 우수한 날(9월)에 이때의 유효전력과 고조파 결과가 가장 우수하게 나타났다. 일조량 변화가 양호한 날에 측정한 결과 일출 시점인 6시 이후 일조량이 측정되면서 전력량도 같이 측정되기 시작하여 일조량이 가장 많은 시간대인 12시부터 14시까지 최대의 전력 발생량이 측정되었다. 최대전력량은 12시 경에 약 440kW로 측정되었다.

그림 9 일조량이 우수한 날의 전원품질 분석 결과

Fig. 9 Analysis of power quality (The day when the amount of sunshine is excellent)

고조파의 경향은 일조량 변화에 민감하게 반응하는 것을 확인할 수 있다. 고조파는 일조량이 일정하게 증가하고 꾸준히 일조량이 있는 경우에 고조파가 작아지는 것을 보였다. 고조파의 경우 태양광발전을 통해 발전량이 꾸준히 보이는 경우에 고조파가 기준치 이하로 나타나는 것을 확인할 수 있었으며, 전체적인 고조파의 측정 결과는 태양광 발전에 의해 유효전력분이 측정되지 않는 새벽, 야간 시간대의 결과와 합쳐진 결과이다.

그림 9는 9월 중 가장 일조량이 우수한 날에 측정한 유효 전력, 피상전력, 무효전력, 상전류의 고조파 성분, 중성선 전류의 고조파 성분, 전압, 전류의 측정 결과를 나타낸 결과이다.

5. 결 론

본 논문은 태양광발전시스템의 태양광 인버터의 출력을 계통 연계할 경우 계통에 공급되는 고조파를 저감시키는 변압기 개발에 관한 것이다.

일반 배전용 변압기를 태양광발전시스템에 설치하였을 경우와 하이브리드 변압기를 설치하였을 때, 수용가에서 발생한 고조파를 수배전용 변압기 및 사용전원에 미치는 영향을 시뮬레이션 하였다. 두 결과 비교시 부하에 발생한 고조파는 상용전원에 미치는 영향을 주기 때문에 고조파 저감용 변압기가 필요함을 알 수 있었다.

계통연계형 분산전원이 전력계통의 전원품질에 미치는 영향을 분석하기 위하여 태양광발전을 설치하여 상업 운전 중인 현장의 전력계통과 분산형 전원이 연계된 공통접속점 중 하이브리드 변압기 1차 측과 2차 측에 전원 품질 분석장치를 설치하여 전원품질에 영향을 주는 요소들을 측정하였다. 그 결과 전력계통과 연계시 전압변동, 전압, 전류의 고조파 THD (%) 등이 증가하였으나 하이브리드 변압기를 통하여 고조파 성분이 저감되는 것을 확인할 수 있었다.

연구결과 및 시험적용을 바탕으로 계통연계형 변압기를 각 용량별로 설계하고, 용량별 고조파 저감에 대한 기준안을 마련할 수 있었으며, 연계설비의 기능 및 성능기준, 인증시험기준 및 관련 전원설비에 따른 실제 변압기를 설계, 제작할 수 있을 것이다.

References

- [1] A.A. Mohmoud, R.D. Shaltz, "A method for analyzing harmonic distribution in AC power systems". IEEE Trans., PAS-101, pp151-161, Aug. 1982.
- [2] P.P. Khera, "Application of zig-zag transformers for reducing harmonics in the neutral conductor of low voltage distribution system" Industry Applications Society Annual Meeting, Conference Record of the IEEE, 7-12pp. 1092 vol.2, Oct.1990.
- [3] K.C Kim, "A Study on the Harmonics Reduction using Phase Shifting Transformer in a Electric Power Distribution System", Journal of the korean institute of Illuminating and Electrical installation Engineers Vol, 16.No 2,pp. 38~44 March 2002

- [4] J.I Jang, D.C. Lee, H.G. Kim, "Current Control of Three-Phase PWM Converters under Unbalanced and Distorted Source Voltage", Journal of power electronics, Vol 12, No. 1, 2007.02.
- [5] Y.B Song, Y.H Cho, D.J Choi, "Development of the Harmonics Reduction and Energy Saving Equipment in Variable Loads", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 20, No.6, pp. 87~95 July 2006
- [6] Y.H Min, D.C Shin, "A study on the Development of the Shell-type Pole Transformer Using the Zig-Zag Winding", Journal of the korean institute of Illuminating and Electrical installation Engineers Vol, 21.No 8, pp. 121~128 March 2007

저 자 소 개

김 지 호 (金 志 濤)

2004년 숭실대 전기공학과 졸업. 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 ㈜에너테크 기술연구소장

박 훈 양

1995년 건국대 행정학과 졸업, 2011년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2003년~현재 (주)에너테크 대표이사

손 진 근 (孫 珍 肋)

1990년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1992/1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사/박사). 2002. 2~2003. 2 일본 가코시마대학 전기공학부 Post-doc. 2009. 1~2010. 2 Michigan State University 방문교수. 2013~현재, 당 학회 회원교육이사/평의원, 1997년~현재, 가천대학교 전기공학과 교수.
E-mail : shon@gachon.ac.kr