

다계 H-브리지로 구성된 UPQC의 실험적 분석

배병열, 이동근, 이두영, 한병문
명지대학교

Experimental Analysis of UPQC with Cascaded H-Bridge Modules

Byung-Yeol Bae, Dong-Geun Lee, Doo-Young Lee, Byung-Moon Han
Myongji University

Abstract - 본 논문은 다계 H-브리지와 다권선 변압기를 이용하여 22.9kV 배전계통에 직접결합하여 전력품질을 보장하는 UPQC(Unified Power Quality Conditioner)를 제안하고 그 동작을 분석한 내용을 기술하고 있다. 제안하는 UPQC는 스위칭소자를 직결한 방식대신 H-브리지로 구성된 인버터모듈을 직결하는 방식으로 동작전압을 증가시켜 배전전압 22.9kV에서 동작할 수 있도록 고안되어 있다. 제안하는 시스템의 기술적 타당성을 입증하기 위해 EMTDC 소프트웨어에 의한 시뮬레이션을 통한 분석을 실시하였으며 또한 하드웨어 축소모형을 제작하여 실험을 통한 분석을 실시하였다. 이러한 검증들을 통하여 제안하는 UPQC는 실제규모로 용량을 확대하여 배전계통에 결합할 경우 동작이 가능할 것으로 보인다. 제안하는 UPQC는 배전전압에 따라 H-브리지 모듈의 수를 가감하여 설계의 유연성을 확보할 수 있고 직렬주입변압기가 없이 동작이 가능하여 기존 UPQC의 직렬주입변압기에 의한 제반 취약점을 제거할 수 있다.

연결되어 있으며, 직렬 측 인버터는 배전선로에 직접 연결된 구조로 되어 있다

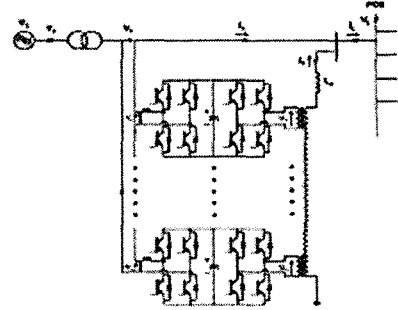


그림 1. 제안하는 UPQC의 구조

1. 서론

소자의 직렬운용을 피하고 시스템의 동작전압을 높이기 위해 제안된 방식이 한 상당 다수의 H-브리지를 직렬로 결합한 방식이 다중브리지인버터이다. 이 다중브리지 인버터는 영국에서 STATCOM으로 적용된 예가 있다.[4] 한편 송전선로의 임피던스를 제어할 목적으로 H-브리지 인버터로 구성된 SSSC가 저자들과 몇몇 연구자에 의해 제안된 바 있다. 이들 시스템은 직렬주입변압기가 없이 동작이 가능하고 H-브리지 모듈수를 증가함으로써 동작전압을 유연하게 확장할 수 있다.

제안하는 UPQC는 비상시 선로로부터 직렬인버터를 분리하기 위한 바이패스 기능이 있다. 바이패스 기능은 싸이리스터 스위치와 기계적인 차단기의 동작에 의해서 구현이 된다. 선로전류는 일단 싸이리스터 스위치에 의해서 바이패스가 되며, 선로전류의 크기가 직렬인버터 스위치의 최대 허용전류 보다 작을 경우에는 싸이리스터 스위치에 의한 바이패스기능을 이용하는 것보다 인버터 제어를 통한 바이패스 기능을 적용할 수 있다. 직렬인버터는 2가지 가능한 바이패스 기능을 갖는데, 그 첫 번째는 직렬인버터의 상단 스위치 두 개를 동시에 턴온하는 것이고, 다른 하나는 직렬인버터의 하단 스위치 두 개를 동시에 턴온하는 것이다.

본 연구에서는 하드웨어 축소모형을 제작하고 비선형 부하와 고장모의가 가능한 전원에 결합하여 실험을 실시하였다. 이렇게 실험을 통해 얻은 측정결과를 PSCAD/EMTDC에 의한 시뮬레이션 결과와 비교하여 실규모 하드웨어를 개발하는데 제반기술을 확립하도록 하였다. 또한 하드웨어를 기동하는데 관련된 알고리즘과 과전류 및 과전압에 대한 보호알고리즘을 부가하였으며, 다중브리지 컨버터에서 발생하기 쉬운 직류링크전압 불평형을 해결하는 알고리즘을 구현하여 타당성을 확인하였다.

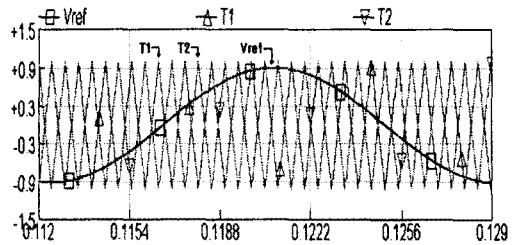
2.2 출력전압 형성

그림 2는 다중브리지 인버터의 PWM 동작 시 H-브리지의 PWM 펄스생성과 출력전압 파형을 나타낸 것이다. 그림 2(a)는 첫 번째 모듈의 게이트 펄스를 생성하기 위한 캐리어와 기준신호를 보여준다. 캐리어 T1과 T2는 위상차가 180°이며 주파수는 각각 1[kHz]이다. 나머지 두 개 모듈의 게이트 펄스를 생성하기 위해서는 각각 T1/T2와 120°의 위상차를 갖는 2세트의 캐리어가 필요하다.

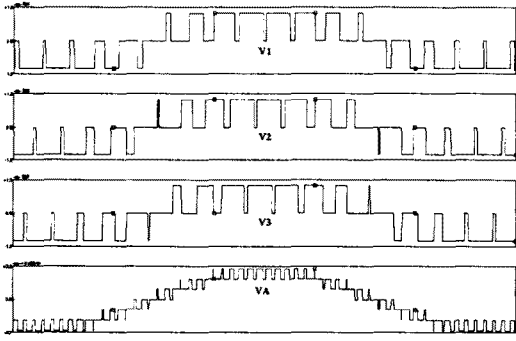
2. 다중브리지 UPQC

2.1 시스템구성

그림 1은 다중브리지 형태의 UPQC 인데 배전선로의 전압크기와 사용하는 스위칭소자의 정격을 고려해 한 상당 n쌍의 H-브리지 인버터로 구성되어 있으며, 각 쌍은 두개의 H-브리지 인버터가 직류링크 캐패시터를 통해 연결된 구조로 되어 있다. 병렬 측의 인버터는 절연을 목적으로 하는 단상 다중권선 변압기를 통해서 직렬로



(a) PWM 펄스발생



(b) 출력전압 파형
그림 2. 인버터 출력전압 생성

그림 2(b)는 H-브리지의 각 모듈의 출력파형과 이들을 결합하여 형성된 선로에 주입되는 출력전압의 파형과 이들의 고조파분석결과를 나타낸 것이다. 그림 2(b)는 다중 브리지 인버터의 각 출력전압 V1, V2, V3 및 최종적으로 선로에 주입하는 전압 VA를 나타내고 있다. 각각의 캐리어 주파수가 1[kHz]이고 총 6개의 캐리어가 존재하므로 6[kHz]의 스위칭 효과가 나타난다. 그러므로 인버터 모듈의 수가 N개라면 출력전압은 $N*2*1$ [kHz]의 스위칭 효과를 가질 수 있다. 한 개의 인버터 모듈 출력 전압에 많은 수의 고조파들이 포함되어 있지만 세 개의 인버터가 직렬로 연결된 출력전압에는 고조파가 적게 포함되어 있다.

2.3 제어기구성

제한하는 UPQC의 제어기는 $\alpha-\beta-0$ 변환을 이용한 순시전력 해석기법을 활용하여 설계하였다. 순시전력 해석기법은 선로 상에 존재하는 역상성분, 영상성분, 고조파성분 등을 쉽게 검출하여, 이에 대한 적절한 보상신호를 연산과정을 통해 생성해 낼 수 있다.

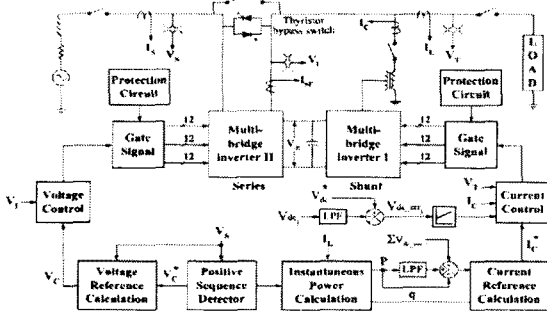


그림 3. 시스템 전체 제어블록도

그림 3은 순시전력 해석기법을 활용하여 설계한 제한된 시스템의 전체 제어블록도이다. UPQC의 제어는 연결점전압의 정상성분검출부와 직·병렬 인버터제어부로 이루어져 있다.

그림 4에 보인 정상성분 전압 검출기는 전원 측 3상 전압 V_S 의 기본파 정상성분 순시치 전압(v'_{sa}, v'_{sb})을 계산하며, 연산된 유효전력(\bar{p}_s)과 무효전력(\bar{q}_s)은 전압 V_S 의 기본파 정상성분을 포함한다. 정상성분 전압의 순시치는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{bmatrix} v'_{sa} \\ v'_{sb} \end{bmatrix} = \frac{1}{i_a'^2 + i_b'^2} \begin{bmatrix} i_a' & i_b' \\ i_b' & -i_a' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p}_s \\ \bar{q}_s \end{bmatrix} \quad (1)$$

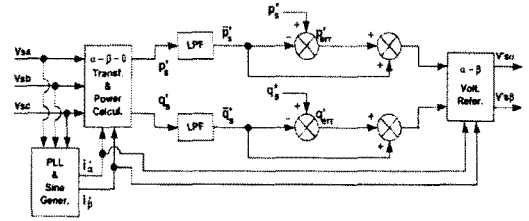


그림 4. 정상성분 전압 검출기

병렬인버터는 비선형 부하에 의해 선로에 발생하는 고조파 전류를 보상하기 위한 APF(Active Power Filter)동작과 다중브리지 인버터의 전압형성에 중요한 각 브리지의 DC 링크전압을 일정하게 제어하는 것이 주된 기능이다. 그림 5는 병렬인버터의 제어 블록도를 나타낸 것이다. 식(2)는 제어 블록도에서 기준보상전류로 표시된 값을 연산하는 관계식을 나타내고 있다. 이렇게 연산된 기준보상전류를 추종하기 위해 블록도에 보이는 바와 같이 P제어를 이용하여 전류제어를 수행하였으며 이것은 Multi-bridge 타입의 분리된 각상에 적용하기에 적합한 성능을 보장한다.

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{sa}'^2 + v_{sb}'^2} \begin{bmatrix} v_{sa}' & -v_{sb}' \\ v_{sb}' & v_{sa}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\bar{p} + \bar{p}_{loss} \\ -\bar{q} \end{bmatrix} \quad (2)$$

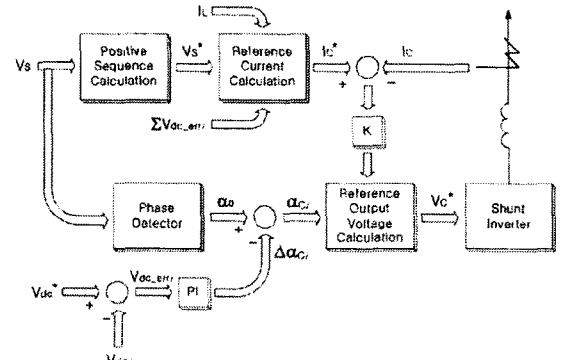


그림 5. 병렬 인버터의 제어블록도

직렬인버터는 순간전압상승(swell), 순간전압강하(sag)와 같은 전압이상현상에 대하여 선로의 전압안정화를 유지하는 기능을 담당하고 있다. 정상성분 전압검출기로부터 연산된 정상성분전압은 이상적인 선로의 기준전압을 의미하며, 전원전압 이상현상 발생 시 정상성분전압과의 차에 의해 발생하는 전압성분이 결국 직렬 인버터를 통해 선로에 주입되어진다. 전압주입 시 원활한 전압주입을 수행하기 위해 feed-forward제어와 P제어기를 사용하였다.

$$v_{ca}^* = [(v'_{sa} - v_{sa}) - v_{ia}] * K + v_{ca} \quad (3)$$

여기서, $(v'_{sa} - v_{sa})$ 는 기본파 정상성분 전압보상과의 차이가 있으며, 전압 V_S 의 모든 부분을 포함하는 보상성분을 나타낸다. 그림 6는 직렬인버터의 제어 블록도를 보여준다.

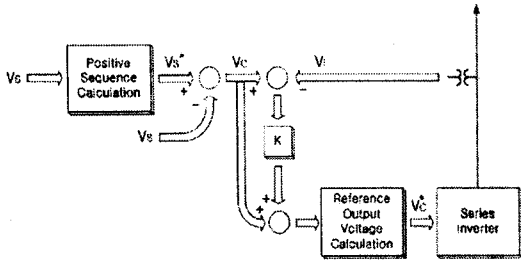


그림 6. 직렬 인버터의 제어블럭도

2.4 축소모형 실험 결과

제안하는 UPQC 시스템에 대하여 향후 실 시스템 적용가능성을 확인하기 위하여 축소모형을 제작하고 실험을 실시하였다. 축소모형은 그림7과 같이 3상전원 시뮬레이터와 직접 제작한 UPQC 시스템, 그리고 부하장치로 배전 시스템 모델을 구성하였다. 표2는 실험에 사용된 회로정수이다.

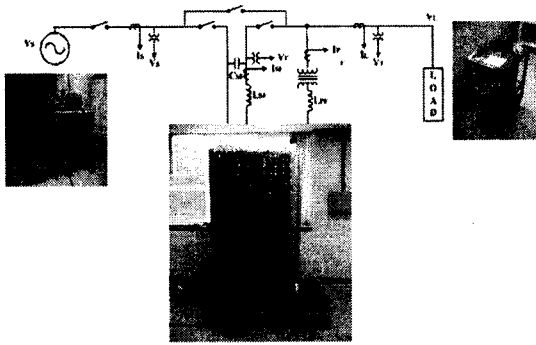


그림 7. 제안하는 UPQC 시스템의 축소모형

표 2. 축소모형의 회로정수

회로정수	
전원전압	110[V], 60[Hz]
DC 링크 캐패시터	2000[μF]
병렬 인버터	
필터 L	2[mH]
단상 다중변압기 권선비	5[kVA], 6 : 1(1차:2차)
직렬 인버터	
필터 L	2[mH]
필터 C	50[μF]
부하조건	
비선형 부하	3상 다이오드정류기
R, L	40[Ω], 62[mH]

그림 8은 세 개의 H-브리지로 구성된 멀티브리지 인버터를 구성하여 임의의 정현파 기준신호와 600[Hz]의 반송파를 사용하여 각 H-브리지의 SPWM 출력전압파형과 세 개의 전압이 합성된 최종 출력파형을 확인한 결과이다. PSC(Phase Shift Carrier) 방식을 이용한 최종 출력파형은 약 3.6[μ]의 스위칭 효과를 볼 수 있으며, 세 개의 출력전압의 합으로 7레벨의 전압을 형성하고 있음을 확인할 수 있다.

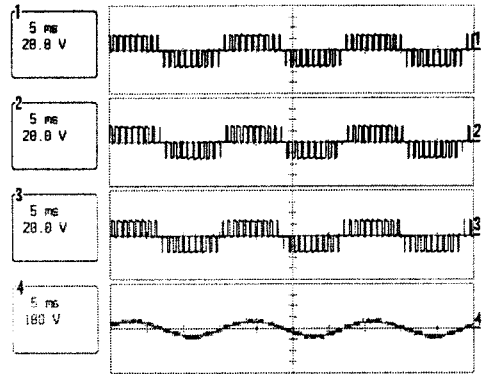


그림 8. 멀티브리지 컨버터의 출력전압파형

병렬 인버터의 APF(Active Power Filter) 동작수행을 확인하기 위한 실험결과파형은 그림 9와 같다. 실험에서는 3상다이오드정류기를 이용하여 비선형부하를 모의하였다. 그림에서 1번은 병렬인버터 제어기에서 생성해낸 기준전류파형이고, 2번은 기준전류파형을 추종하고 있는 실제 인버터 출력전류파형이다. 3번은 병렬인버터의 보상전류에 의해 정현파에 가깝게 변화된 전원전류의 파형이고 4번은 부하전류의 파형이다.

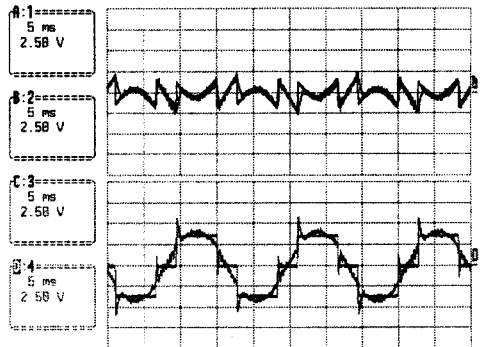
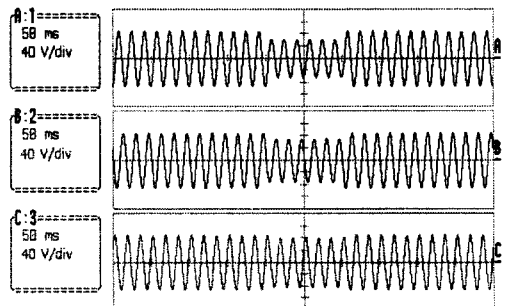


그림 9. 병렬인버터 APF 동작모드

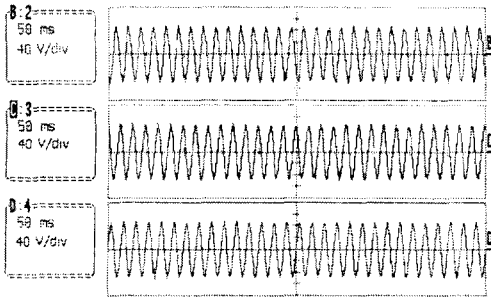
그림 10과 11는 직렬인버터의 DVR(Dynamic Voltage Conditioner) 동작을 확인한 실험결과파형이다. 그림 10(a)와 같이 전원전압에 A상 30[%], B상 20[%], C상 10[%]의 순시전압강하 이벤트를 발생시켰을 때, 직렬인버터의 보상전압에 의해 부하전압은 그림 10(b)와 같이 A상, B상, C상 모두 일정하게 유지되고 있음을 확인할 수 있다.



(a) 전원전압

[참 고 문 헌]

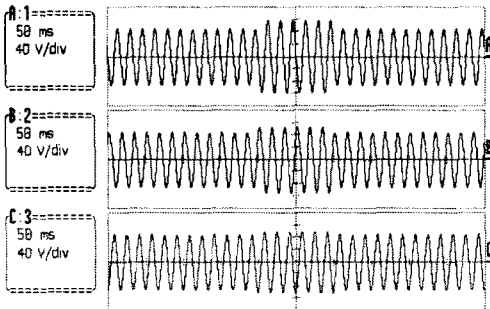
- [1] H. Fujita, H. Akagi, "The unified power quality conditioner: the integration of series and shunt active filters", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 13, No.2, Mar 1998, pp.315-322.
- [2] F. Z. Peng, J. W. McKeever, D. J. Adams, "A power line conditioner using cascade multilevel inverters for distribution systems", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 34, No.6, Nov/Dec 1998, pp. 1293-1298.
- [3] B. Han, S. Baek, H. Kim, G. Karady, "Dynamic Characteristic Analysis of SSSC Based on Multibrige Inverter", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 17, No. 2, April 2002.
- [4] B. H. Li, S. S. Choi, and D. M. Vilathgamuwa, "Transformerless dynamic voltage restorer", IEE Proceedings in Generation, Transmission, Distribution, Vol. 140, No. 3, pp.263-273, May 2002.



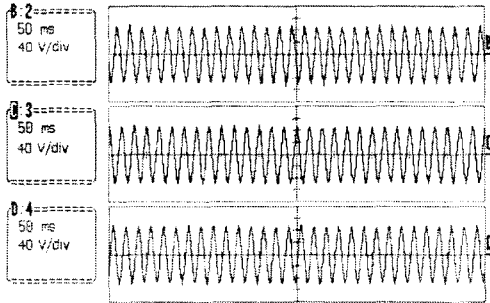
(b) 부하전압

그림 10. 순시전압강하 보상

그림 11는 반대로 A상 30[%], B상 20[%], C상 10[%]의 순시전압상승 이벤트를 발생시켰을 때의 실험결과파형이다. 마찬가지로 직렬인버터 보상기능에 의해 부하전압이 사고 이벤트와 상관없이 일정하게 유지되고 있음을 확인할 수 있다.



(a) 전원전압



(b) 부하전압

그림 11. 순시전압상승 보상

이상의 실험으로 제안하는 시스템이 UPQC의 기능을 충실히 수행함을 확인할 수 있었다.

3. 결 론

본 논문에서는 단상 다중권선 변압기로 절연된 H-브리지 인버터를 이용한 새로운 UPQC를 제안하고 실 시스템의 적용 가능성을 축소모형 제작과 실험을 통해 확인하였다. UPQC에 있어서 직렬주입 변압기는 낮은 포화 영향과 누설 임피던스를 갖도록 설계해야 하기 때문에 매우 중요한 요소로 간주되어진다. 제안하는 UPQC는 이러한 직렬 주입 변압기가 없이 선로에 직접 연결이 가능하며, 인버터의 브리지 수를 증가시킴으로써 유연하게 동작전압을 높일 수 있다는 장점이 있다.