

H-브리지 모듈로 구성된 UPQC(Unified Power Quality Conditioner)의 동작 분석

論 文

54A-1-1

Operation Analysis of UPQC(Unified Power Quality Conditioner) based on H-bridge Modules

李 範 奎* · 裴 炳 烈** · 白 承 澤*** · 韓 炳 文†

(Bum-Kyoo Lee · Byung-Yeol Bae · Seung-Tak Baek · Byung-Moon Han)

Abstract - This paper proposes a novel UPQC(unified power quality conditioner) based on H-bridge modules, isolated through single-phase multi-winding transformers. The dynamic performance of proposed system was analyzed by simulation with PSCAD/EMTDC, assuming that the UPQC is connected with the 22.9kV distribution line. The proposed system can be directly connected to the transmission line without series injection transformers. It has flexibility in expanding the operation voltage by increasing the number of H-bridge modules and can compensate reactive power, harmonics, voltage sag and swell, voltage unbalance. The proposing UPQC has the ultimate capability of improving power quality at the point of installation on power distribution systems.

Key Words : UPQC, H-브리지, 멀티레벨 인버터, EMTDC

1. 서 론

최근 정보통신 기기의 급속한 확산과 산업기기의 고정밀화에 따라 양적인 측면의 전원공급은 점차 고품질 전원공급으로 전환하고 있다. 이에 따라 전력회사에서는 전력계통의 안정화와 전력품질 향상을 위해 다양한 대책을 수립하고 있으며, 선진국을 중심으로 새로운 전력공급체제 구축을 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다[1].

이와 같은 시대적 흐름에 따라 고조파전류 보상장치인 능동전력필터(Active Power Filter), 동적전압 보상기(Dynamic Voltage Restorer), 배전용 무효전력보상기(D-SATCOM), 고속전환장치(High-speed Transfer Switch)등과 같은 Custom Power기기에 대한 많은 관심과 연구가 진행되어지고 있다. 이러한 Custom Power기기 중의 하나로 최근 활발히 연구되어지고 있는 UPQC(Unified Power Quality Conditioner)는 직렬과 병렬인버터가 직류 캐패시터를 공유하는 형태로 구성되며, 배전계통의 PCC(point of common coupling)에 위치해선로 상에서 발생하는 전압변동, 고조파보상, 전력조류제어 등을 수행할 수 있다[2][3][4].

일반적인 Custom Power기기는 저압배전계통에 적용되며, 비교적 높은 스위칭 주파수를 요하기 때문에 스위칭 소자로 IGBT를 많이 사용한다. 그러나 22.9kV급 배전선로에 적용시 현재로서는 IGBT 스위칭 소자의 정격이 낮기 때문에 적용에 어려움이 있다.

이러한 문제점을 극복하기위해 스위칭 소자의 직렬운용 기법이 개발되어 있지만, 직렬운용이 대단히 난이하고 직렬운용이 가능한 소자 수에도 많은 제약이 따른다. 또한, 소자의 직렬운용을 피하고 동작전압을 높이기 위해 다중레벨 인버터가 제안되었지만, 다중레벨 인버터는 출력전압의 형성이 복잡하고 많은 역결합 다이오드를 필요로 한다. 따라서 전력계통과 원만한 결합을 위해 강압변압기를 사용하는 것이 보편적이다.

이러한 단점을 보완하고자 Peng은 한 상당 5개의 H-브리지로 구성된 다중브리지 무효전력보상기와 능동전력필터를 제안하였고[5][6], 한 상당 6개의 H-브리지 또는 3개의 3레벨 H-브리지로 구성된 두 가지 형태의 SSSC를 저자가 제안한 바 있다[7][8]. 또한 최근에는 3개의 H-브리지로 구성된 동적전압보상기가 Li에 의해 제안된 바 있다[9].

본 논문에서는 단상 다권선 변압기로 절연된 H-브리지를 이용한 새로운 UPQC를 제안하고 제안한 시스템의 동특성을 검증하기위해 PSCAD/EMTDC를 이용한 시뮬레이션을 실시하였다. 제안하는 UPQC는 직렬 주입용 변압기 없이 선로에 직접결합이 가능하며, 직렬변압기의 포화와 전압강하에 따른 문제점을 제거 할 수 있고 동작전압에 따라 모듈을 가감할 수 있어 운용에 유연성을 갖는다.

2. 기존 UPQC

일반적인 UPQC는 두 대의 인버터가 직류링크를 공유한 형태로 배전선로에 각각 직렬과 병렬형태로 연계되어, 선로의 고조파 및 발생하는 여러 가지 문제점을 보상하는 것을 주목적으로 하고 있다. 직렬 인버터는 전원 측과 PCC사이에 직렬로 연결되어 전압원 형태의 전압 조정기로서 동작하며, 병렬 인버터는 선로에 병렬로 연결되어 전류원처럼 동작하게 된다. 이러한 구조의 UPQC는 선로 상에서 발생하는 전압변

† 교신저자, 正會員 : 明知大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
E-mail : erichan@mju.ac.kr

* 學生會員 : 明知大 工大 電氣工學科 碩士課程

** 學生會員 : 明知大 工大 電氣工學科 博士課程

*** 正會員 : 明知大 工大 電氣工學科 工博

接受日字 : 2004年 8月 9日

最終完了 : 2004年 12月 6日

동 보상, 고조파전류 및 전압 보상, 전력조류 제어 등의 기능을 갖는다.

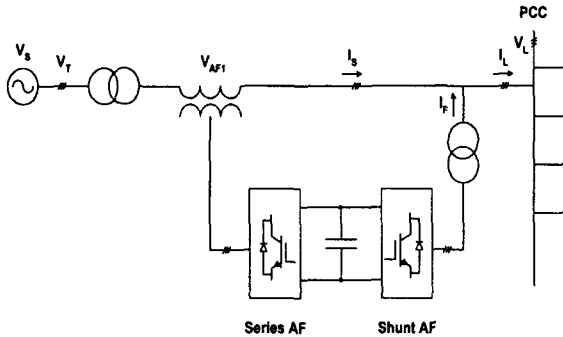


그림 1. 기존 UPQC의 구조
Fig. 1. Configuration of existing UPQC

기존 UPQC는 동작전압을 높이기 위해 스위칭 소자인 IGBT를 직렬로 결합하여 하나의 스위치로 사용하는 직렬운용기법을 사용하고 있다. 하지만 IGBT의 직렬운용은 대단히 난이하고 직렬운용이 가능한 최대허용 소자 수에도 제약이 있다. 따라서 배전계통과의 원만한 결합을 위해 직렬부와 병렬부 모두에 강압변압기를 사용하는 것이 일반적이다. 그런데 직렬변압기의 경우 선로에 직렬로 결합되어 있어 누설 리액턴스가 적고 철심의 포화현상이 적을 것이 요구된다. 따라서 직렬변압기의 경우 권선을 특수하게 배치하고 철심에는 공극을 두는데 이러한 특성 때문에 외형이 상당히 크고 가격이 매우 높은 단점을 갖는다. 스위칭 소자를 직렬 운용하는 기술이 더욱 발전하여 최대허용 소자수가 단일 인버터로 배전전압을 감당하기에 충분하면 직렬변압기가 없는 UPQC가 가능하나 현재의 기술로는 불가능하다.

3. 제안하는 UPQC

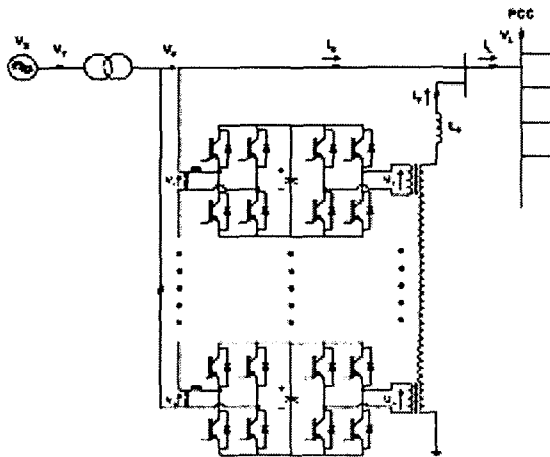


그림 2. 제안하는 UPQC의 구조
Fig. 2. Configuration of proposed UPQC

그림 2는 본 논문에서 제안하는 다중브리지 형태의 UPQC를 보여준다. 제안하는 UPQC는 배전선로 전압의 크기와 사

용하는 스위칭 소자의 정격을 고려해 한 상당 \$n\$쌍의 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 연결되어 있으며, 직렬 측 인버터는 배전선로에 직접 연결된 구조로 되어 있다.

제안하는 시스템의 동작을 시뮬레이션으로 확인할 목적으로 편의상 그림 3(a)와 (b)에 나타난 것처럼 병렬과 직렬 인버터를 각각 한 쌍의 H-브리지 인버터 모듈로 구성하였다. 그림 3(c)는 기본모듈인 H-브리지 모듈의 PWM 출력파형형성을 나타낸 것이다. 이러한 출력파형을 발생하기 위해서는 스위치 \$S1 \sim S4\$를 적절히 동작시켜 출력전압의 크기가 \$V_{dc}, 0, -V_{dc}\$ 세 레벨을 형성해야 하는데 각 레벨에 대한 스위치 동작을 표 1에 나타내었다.

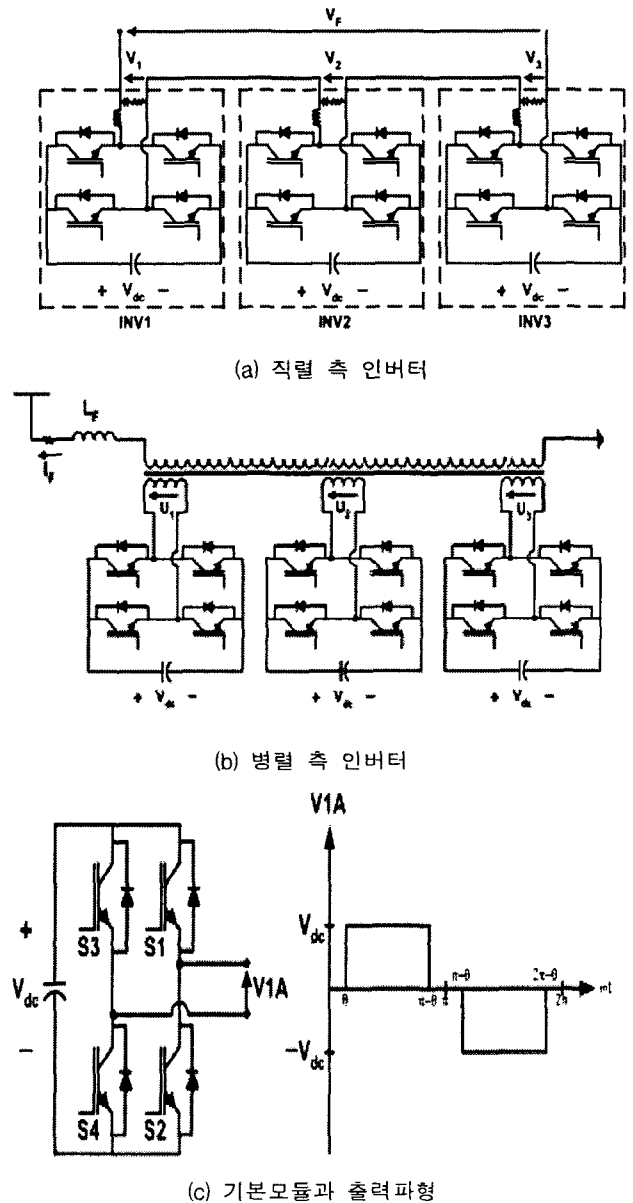


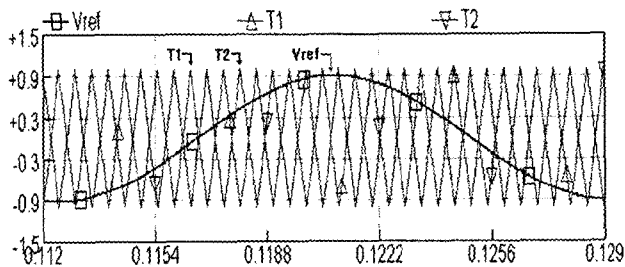
그림 3. 인버터의 구조 및 기본모듈
Fig. 3. Inverter structure and basic module

표 1. H-브리지의 스위칭 방식

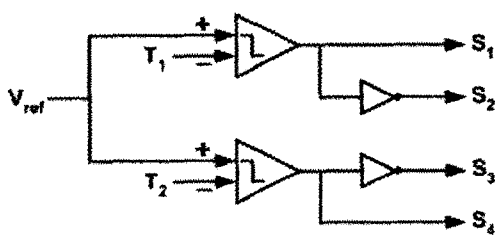
Table 1. Switching Pattern of H-bridge

VIA	Switching State
V_{dc}	S1, S4 : ON and S2, S3 : OFF
0	1) S1, S3 : ON and S2, S4 : OFF 2) S2, S4 : ON and S1, S3 : OFF
$-V_{dc}$	S2, S3 : ON and S1, S4 : OFF

그림 4는 다중브리지 인버터의 PWM 동작 시 H-브리지의 PWM 펄스생성과 이를 위한 로직 회로도를 나타낸 것이다. 그림 4(a)는 첫 번째 모듈의 게이트 펄스를 생성하기 위한 캐리어와 기준신호를 보여준다. 캐리어 T1과 T2는 위상차가 180°이며 주파수는 각각 1[kHz]이다. 나머지 두개 모듈의 게이트 펄스를 생성하기 위해서는 각각 T1/T2와 120°의 위상차를 갖는 2세트의 캐리어가 필요하다. 그림 4(b)는 H-브리지의 게이트 펄스생성 방법을 로직 구성도로 나타낸 것이다.



(a) 캐리어(T1, T2)와 기준신호(Vref)



(b) 게이트 펄스 생성방법

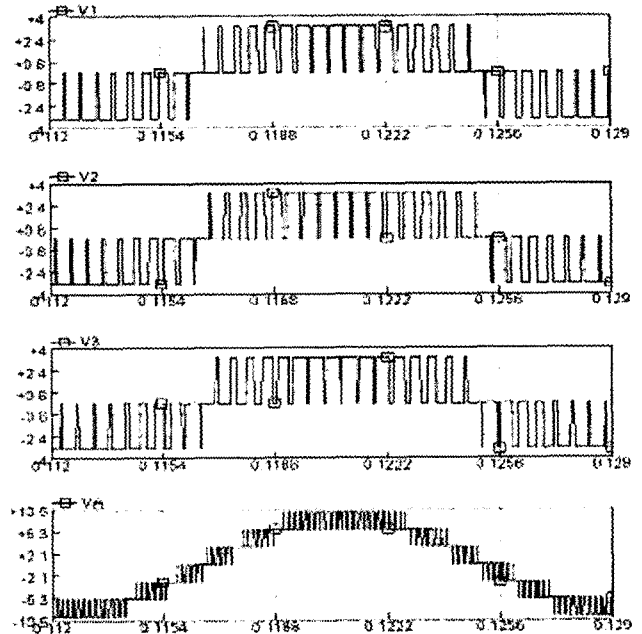
그림 4. H-브리지의 PWM 펄스 생성

Fig. 4. PWM pulse generation for H-bridge

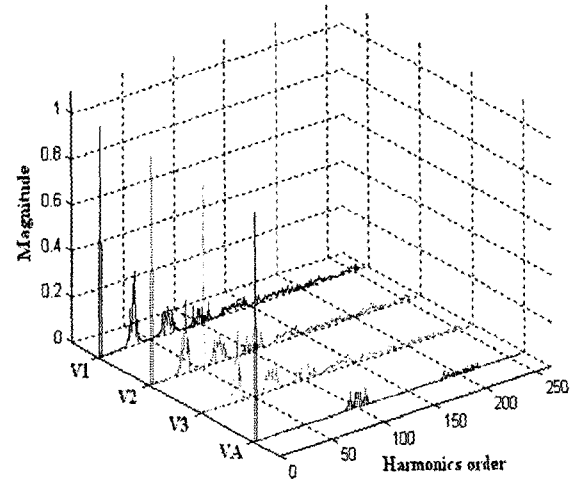
그림 5는 H-브리지의 각 모듈의 출력파형과 이들을 결합하여 형성된 선로에 주입되는 출력전압의 파형과 이들의 고조파분석결과를 나타낸 것이다. 그림 5(a)는 다중브리지 인버터의 각 출력전압 V1, V2, V3 및 최종적으로 선로에 주입하는 전압 VA를 나타내고 있다.

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 스위

칭 효과를 가질 수 있다. 그림 5(b)는 한 개의 인버터 모듈 출력전압과 세 개의 인버터가 직렬로 연결된 출력전압의 스펙트럼 분석 결과를 나타낸 것이다. 한 개의 인버터 모듈 출력전압에 많은 수의 고조파들이 포함되어 있지만 세 개의 인버터가 직렬로 연결된 출력전압에는 고조파가 적게 포함되어 있다.



(a) 인버터 각 출력전압 V1, V2, V3 및 최종 출력전압 VA의 전압파형



(b) V1과 VA의 스펙트럼 분석

그림 5. 인버터 출력전압과 고조파 분석

Fig. 5. Waveform and harmonics analysis of output

그림 6은 인버터 모듈 수에 따른 출력전압의 THD 분석을 나타낸 것이다. 출력전압의 THD는 인버터 모듈 수가 증가하면 감소되는 것을 알 수가 있다. 동일한 수의 인버터 모듈에서 변조비(MI)가 0.4보다 작아질 경우 비교적 THD가 커짐을 확인할 수 있다. 따라서 변조비의 동작영역은 0.5~1.0 사이가 적절하다.

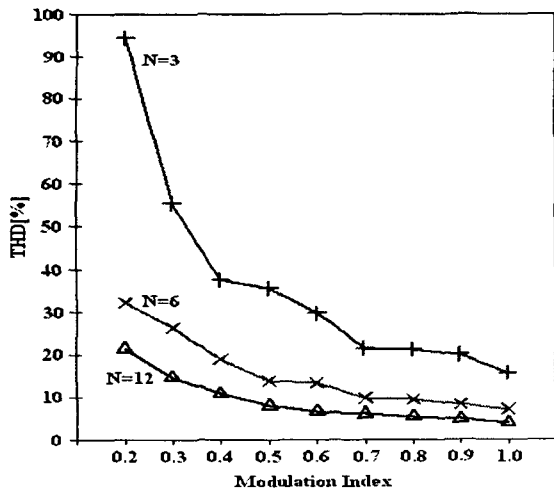


그림 6. 모듈 수에 따른 출력전압의 THD
Fig. 6. THD with respect to number of modules

4. PSCAD/EMTDC 시뮬레이션

다중브리지 인버터로 구성된 제안하는 UPQC의 동작과 성능을 분석하기 위해 계통해석에 유용한 프로그램인 PSCAD/EMTDC(Power System Computer Aided Design/Electro Magnetic Transients DC Analysis Program)을 사용하여 전체적인 시뮬레이션을 수행하였다.

UPQC의 전체적인 시뮬레이션 모형은 3상 4선식으로 구성된 선로모형에 캐패시터를 공유하는 형태의 직·병렬 다중브리지 인버터가 22.9[kV] 전원 측과 부하 사이에 연결되어 있으며, 부하로는 비선형 특성을 나타내는 유도성 다이오드 정류기 부하와 저항과 인덕턴스로 구성된 선형부하로 구성되어 있다. 시뮬레이션에 사용된 자세한 회로정수는 표 2에 나타내었다.

표 2. 시뮬레이션 모형의 회로정수
Table 2. Circuit parameters of simulation model

회로정수	
전원전압	22.9[kV], 60[Hz]
전원임피던스	0.001[Ω], 0.01[mH]
DC 링크 캐패시터	10000[μF]
DC 링크 기준전압	3.3[kV]
병렬 인버터	
필터 L	5[mH]
단상 다중변압기 권선비	6 : 1(1차:2차)
직렬 인버터	
필터 R	1[Ω]
필터 L	0.5[mH]
필터 C	200[μF]
부하조건	
다이오드 정류기 부하	
R, L	550[Ω], 1[mH]
선형 부하	
R, L	378[Ω], 485[mH]

UPQC의 제어는 연결점전압의 정상성분검출부와 직·병렬 인버터제어부로 이루어져 있다. 제안하는 UPQC의 제어기는 α-β-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 7에 보인 정상성분 전압 검출기는 전원 측 3상 전압 V_S 의 기본과 정상성분 순시치 전압(v'_{sa}, v'_{sb})을 계산하며, 연산된 유효전력(\bar{p}'_s)과 무효전력(\bar{q}'_s)은 전압 V_S 의 기본과 정상성분을 포함한다. 정상성분 전압의 순시치는 다음과 같이 계산된다.

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

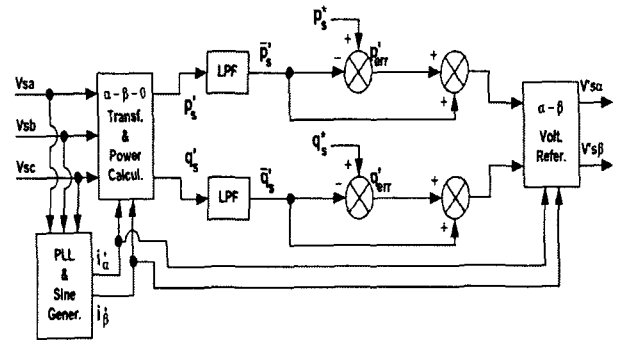


그림 7. 정상성분 전압 검출기
Fig. 7. Positive sequence voltage detector

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 8은 병렬인버터의 제어 블럭도를 나타낸 것이다. 식(2)는 제어 블럭도에서 기준보상전류로 표시된 값을 연산하는 관계식을 나타내고 있다.

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

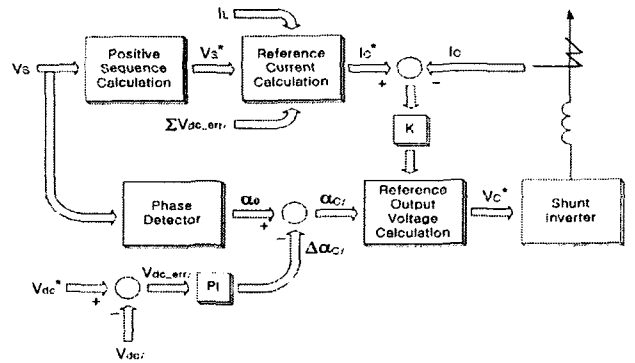


그림 8. 병렬 인버터의 제어블럭도
Fig. 8. Control block diagram of the shunt converter

그림 9는 병렬 인버터의 APF 동작에 따른 고조파 전류 보상파형을 나타내고 있다. 부하전류에 대해 전원전류는 거의 정현파에 가까움을 볼 수 있다.

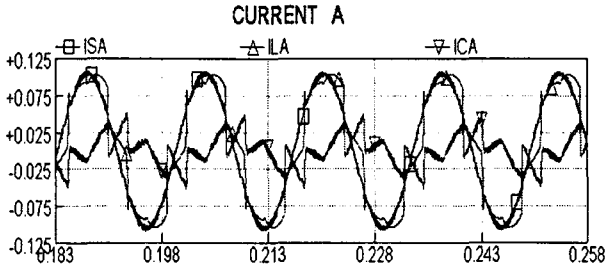


그림 9. 병렬 인버터의 APF 동작 모드
Fig. 9. APF operation of the shunt converter

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

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

여기서, $(v'_{sa} - v_{sa})$ 는 기본파 정상성분 전압보상과는 차이가 있으며, 전압 V_S 의 모든 부분을 포함하는 보상성분을 나타낸다. 그림 10은 직렬인버터의 제어블럭도를 보여준다.

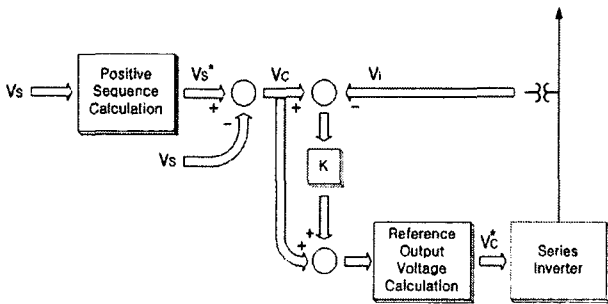
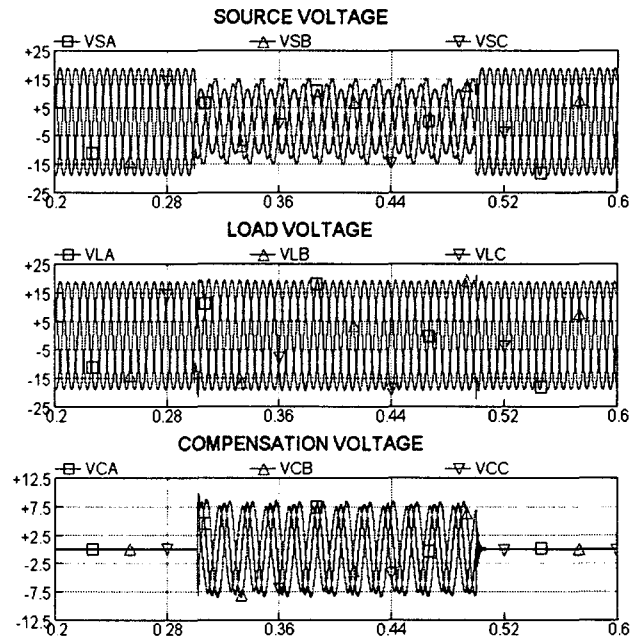


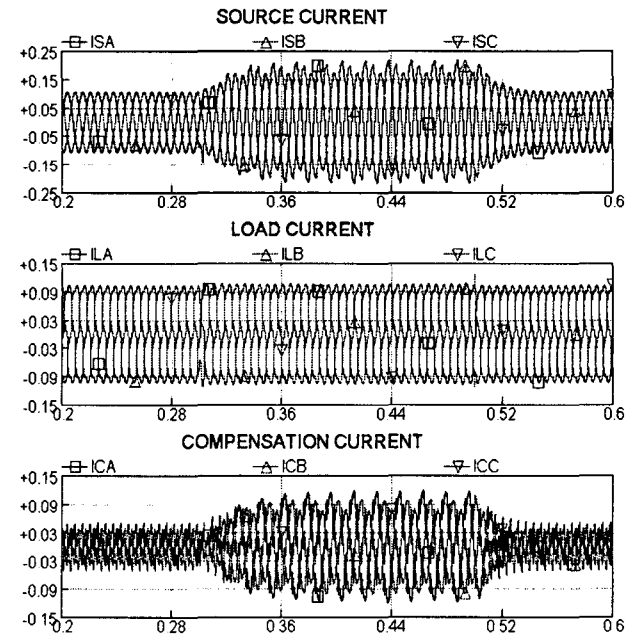
그림 10. 직렬 인버터의 제어블럭도
Fig. 10. Control block diagram of the series converter

그림 11은 배전선로의 전원 측 A, B, C상이 각각 40%, 30%, 20%의 sag가 발생하였을 경우에 따른 각 부의 파형을 나타낸 것이다. 그림 10(a)는 sag 발생 시 전원전압과 부하 전압, 직렬인버터 보상전압을 나타내고 있으며, 10(b)는 전원 전류, 부하전류, 병렬인버터 보상전류를 나타내고 있다. 정상 시 UPQC는 병렬 인버터를 통해 선로의 고조파 전류를 보상하게 되며, sag발생시에는 직렬 인버터에 에너지를 공급하게 된다. 이때, 전원 측 선로의 전류가 병렬인버터 쪽으로 급격하게 유입됨을 볼 수 있으며, 부하 측으로는 안정된 전력이

공급되어짐을 볼 수 있다.



(a) 전원전압, 부하전압, 직렬인버터 보상전압



(b) 전원전류, 부하전류, 병렬인버터 보상전류

그림 11. 전원전압 sag 모드 시 각부 결과파형
Fig. 11. Simulation results with voltage sag

그림 12는 배전선로의 전원 측 A, B, C상이 각각 30%, 20%, 10%의 swell이 발생하였을 경우에 따른 각 부의 파형을 나타낸 것이다. sag 시와 마찬가지로 전원전압은 UPQC에 의해 정확하게 보상되어 부하에는 일정한 전압이 나타남을 알 수 있고, 부하전류 또한 전원전류와 보상전류의 합이 됨을 알 수 있다.

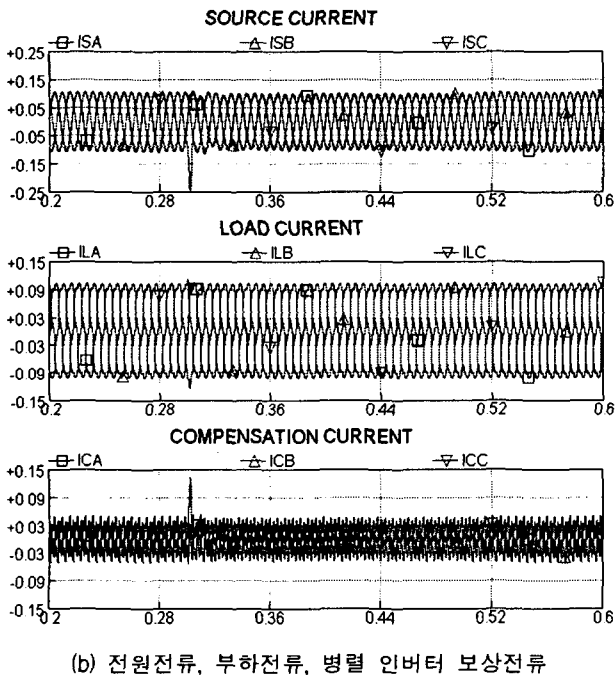
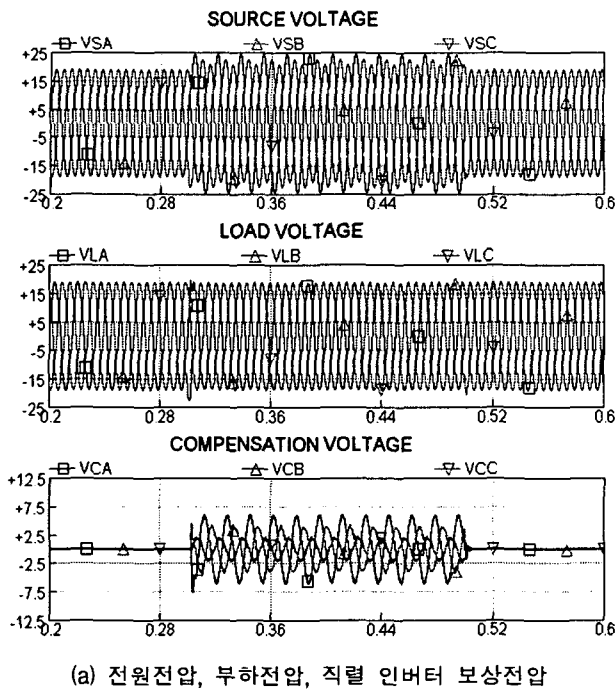


그림 12. 전원전압 swell 모드 시 각부 결과파형
Fig. 12. Simulation results with voltage swell

5. 시스템구현

제안하는 UPQC 시스템을 22.9kV급 배전선로에 실질적으로 적용하는데 있어서, 시스템 설계에 따른 경제성과 동작의 신뢰성은 무엇보다 중요하다 할 수 있겠다. 그런 점에서, 스위칭 소자의 결정은 전체 시스템 설계에 있어서 우선적으로 고려되어야 할 사항이다. 제안하는 시스템을 실제 설계 할 경우, 현재 제작 가능한 IGBT 스위칭 소자로는 eucpc에서

제공하는 듀얼 형태의 FF200R33KF2가 적당할 것으로 판단된다. FF200R33KF2는 3.3kV 200A 정격의 IGBT 스위칭 소자로서 안정적인 시스템의 운용을 감안할 경우 2.2kV 140A 선이 안정적인 동작 영역이라 할 수 있겠다. 만일, 시뮬레이션과 같이 부하조건 3MVA급의 22.9kV 배전선로에서 직렬 인버터 보상전압이 선로 상전압에 대해 최고 50%(약 6.6kV)를 요하는 시스템을 FF200R33KF2 스위칭 소자를 사용하여 설계한다면, 각 상당 H-bridge 모듈 4쌍으로 구성된다. 여기서, 하나의 H-bridge 인버터는 약 1.65kV의 전압을 요하기 때문에, FF200R33KF2를 사용할 경우 인버터는 안정적인 동작을 할 수 있다. 이때, 병렬 인버터 측의 단상 다중변압기의 권수비는 8:1로 구성된다. 그림 12는 이와 같은 설정에 따른 시스템 구현을 위한 개념도를 보여주며, 그림에서와 같이 위의 조건하에서 제안하는 UPQC 시스템을 설계할 경우, 한 상당 4쌍 씩 총 12쌍의 H-bridge 모듈로 인버터가 구성되며, FF200R33KF2 IGBT 사용 시 48개로 구성 가능하게 된다.

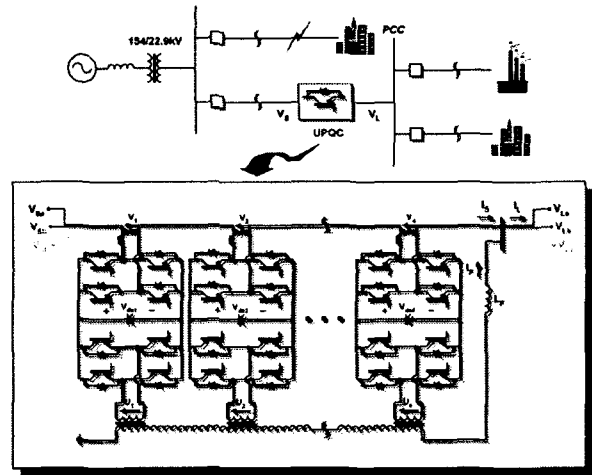


그림 12. 시스템 구현을 위한 개념도
Fig. 12. Conceptual diagram for system realization

6. 결론

본 논문에서는 배전선로에서 발생할 수 있는 각종 외란 (voltage sag, voltage swell, harmonics, over voltage, under voltage)에 대하여 연속적으로 보상하는 단상 다중권선 변압기로 절연된 H-브리지 인버터를 이용한 새로운 UPQC를 제안하고 그 동작원리와 제어방식을 EMTDC/PSCAD를 이용해 시뮬레이션으로 분석하였다. UPQC에 있어서 직렬주입 변압기는 낮은 포화영향과 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.

본 논문에서 개발한 UPQC 시뮬레이션 모델은 향후 실 시스템 설계 시 중요한 자료로 사용될 수 있으리라 사료되며, 실 시스템 개발 시 전력품질개선 기기로서의 역할을 충분히 소화해 낼 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국 학술진흥재단 선도 연구자 사업 (과제 번호 2003-041-D00248)의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] N. G. Hingorani, "Introducing Custom Power," IEEE Spectrum, June 1995, pp. 41-48.
- [2] M. Aredes, K. Heumann, E. H. Watanabe, "An universal active power line conditioner", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 13, No.2, Apr 1998, pp. 545-551.
- [3] Mauricio Aredes, etc. "A Combined Series and Shunt Active Power Filter", IEEE/KTH Stockholm Power Tech Conference, Stockholm. Sweden, June 1995, pp. 18-22.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] F. Z. Peng, J. S. Lai, "A Multilevel Voltage-Source Inverter with Separate DC Source for Static Var Generation", IEEE/IAS Annual Meeting. pp. 2541-2548, Orlando, FL, Oct. 8-12, 1995.
- [7] B. Han, S. Baek, H. Kim, G. Karady, "Dynamic Characteristic Analysis of SSSC Based on Multi-bridge Inverter", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 17, No. 2, April 2002.
- [8] B. Han, H. Kim, S. Baek, "Performance analysis of SSSC based on three-level multi-bridge PWM inverter", Elsevier Science, Electric Power System Research, Vol. 61, No. 3, pp.195-202, June 2002.
- [9] 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.

저 자 소 개



이 범 규(李 範 奎)

1974년 10월 24일생.
2002년 명지대 전기공학과 졸업
현재 명지대 대학원 전기공학과 석사과정



배 병 열(裵 炳 烈)

1975년 11월 17일생.
2001년 명지대 전기공학과 졸업.
2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



백 승 택(白 承 澤)

1971년 11월 24일생.
1997년 명지대 전기공학과 졸업.
1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박).
현재 명지대 차세대전력기술연구센터 전임연구원.



한 병 문(韓 炳 文)

1953년 7월 5일생.
1976년 서울대 전기공학과 졸업.
1988년 미 아리조나주립대 대학원 전기공학과 졸업(석사).
1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박).
미 Westinghouse중앙연구소 선임연구원.
현재 명지대 전기공학과 교수.