

직렬주입변압기가 없는 새로운 UPQC(Unified Power Quality Conditioner)의 성능분석

김희중⁰, 배병열, 전영수, 한병문, 김현우*
 명지대학교, 경민대학*

Operation Analysis of Novel UPQC(Unified Power Quality Conditioner) without Series Injection Transformers

H.J. Kim⁰, B.Y. Bae, Y.S. Jon, B.M. Han, and H.W. Kim*
 Myongji University, Kyungmin College*

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 EMTDC/PSCAD, 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 control strategy for the proposing UPQC was derived using the instantaneous power method. The proposing UPQC has the ultimate capability of improving power quality at the point of installation on power distribution systems or industrial power systems and can be utilized for the future distribution system.

1. 서 론

최근 정보화 기기의 급속한 확산과 산업기기의 고도 정밀화에 따라 과거 양적인 측면의 전원공급은 점차 전력품질의 향상 쪽에 더욱 주안점을 두고 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 보상 장치인 능동전력필터(Active Power Filter), 정지형 동적전압 보상기(Dynamic Voltage Restorer), 배전용 무효전력보상기(D-SATCOM), 정지형 고속절환장치(Sub-cycle Switch)등과 같은 Custom Power 기기에 대한 많은 관심과 연구가 진행되어지고 있다. 이러한 Custom Power 기기 중의 하나로 최근 활발히 연구되어지고 있는 UPQC(Unified Power Quality Conditioner)는 직렬과 병렬컨버터가 직류 캐패시터를 공유하는 형태로 구성되며, 배전계통의 PCC(point of common coupling)에 위치해 선로 상에서 발생하는 전압변동, 고조파보상, 전력조류제어 등을 수행할 수 있다.^{[2][3][4]}

일반적인 Custom Power 기기는 저압배전계통에 적용되며, 비교적 높은 스위칭 주파수를 요하기 때문에 스위칭 소자로 IGBT를 많이 사용한다. 그러나 22.9kV급 배전선로에 적용 시 현재로서는 IGBT 스위칭소자의 정격이 낮기 때문에 적용에 어려움이 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 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 강압 변압기를 사용하는 것이 보편적이다.

이러한 단점을 보완하고자 Peng은 한 상당 5개의 단상 풀브리지로 구성된 다중브리지 STATCOM을 제안하였고,^{[5][6]} 한 상당 6개의 단상 풀브리지와 3개의 3레벨 풀브리지로 구성된 두 가지 형태의 SSSC를 저자가 제안한 바 있다.^{[7][8]}

본 논문에서는 단상 다권선변압기로 절연된 단상 폴브리지를 이용한 새로운 UPQC를 제안하고 제안한 시스템의 동특성을 검증하기 위해 EMTDC/PSCAD를 이용한 시뮬레이션을 실시하였다. 제안하는 UPQC는 직렬 주입용 변압기 없이 선로에 직접 결합이 가능하며, 직렬변압기의 포화와 전압강하에 따른 문제점을 제거할 수 있고 동작전압에 따라 모듈을 가감할 수 있어 운용에 유연성을 갖는다.

2. 본론

2.1 제안하는 UPQC

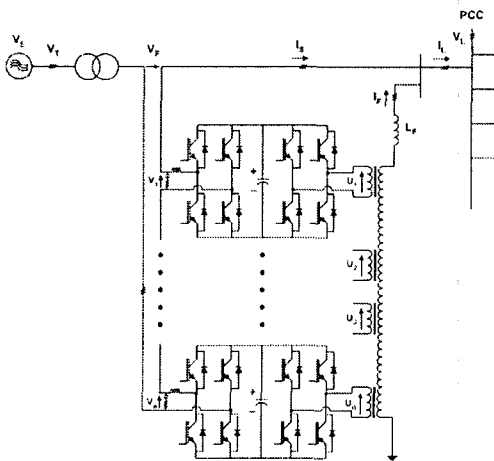


그림 1 UPQC의 구조
Fig. 1 Configuration of UPQC

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 컨버터는 전원 측과 PCC 사이에 직렬로 연결되어 전압원 형태의 전압 조정기로서 동작하며, 병렬 컨버터는 선로에 병렬로 연결되어 전류원처럼 동작하게 된다. 이러한 구조의 UPQC는 선로 상에서 발생하는 전압변동 보상, 고조파전류 및 전압 보상, 전력조류 제어 등의 기능을 갖는다. 그림 1은 본 논문에서 제안하는 다중브리지 형태의 UPQC를 보여준다. 제안하는 UPQC는 배전선로 전압의 크기와 사용하는 스위칭 소자의 정격을 고려해 한 상당 n쌍의 단상 폴브리지 인버터로 구성되어 있으며, 각 쌍은 두개의 단상 폴브리지 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.

2.2 EMTDC/PACAD 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 수행하였으며, 주회로도는 그림 2와 같다.

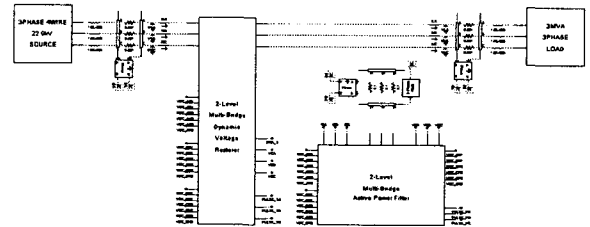


그림 2 시뮬레이션 모델
Fig. 2 Simulation Model

UPQC의 전체적인 시뮬레이션 모형은 3상 4선식으로 구성된 선로모형에 캐패시터를 공유하는 형태의 직·병렬 다중 브리지 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 1에 나타내었다.

표 1 시뮬레이션 모형의 회로정수

Table 1 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 컨버터	
필터 L	5[mH]
단상 다중변압기 권선비	6 : 1(1차:2차)
직렬 컨버터	
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 정상성분 전압검출부와 직·병렬 인버터 제어부등으로 이루어져 있다. 그림 3의 정상성분 전압 검출기는 전원 측 3상전압(V_S) 기본과 정상성분의 순시치전압($v'_{sa}, v'_{s\beta}$)을 계산하며, 연산된 유효전력(\overline{p}'_s)과 무효전력(\overline{q}'_s)은 전압 V_S 의 기본과 정상성분을 포함한다. 정상성분 전압의 순시치는 다음과 같이 계산된다.

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

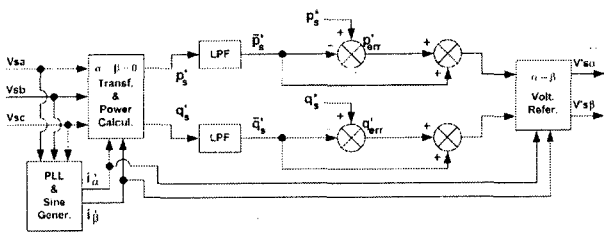


그림 3 정상성분 전압 검출기
Fig. 3 Positive sequence voltage detector

병렬컨버터는 비선형 부하에 의해 선로에 발생하는 고조파 전류를 보상하기 위한 APF(Active Power Filter)동작과 다중브리지 인버터의 전압형성에 중요한 각 브리지의 DC링크전압 일정 제어가 주된 기능이라 할 수 있으며, 식(2)는 이에 따른 기준전류 연산에 관한 관계식을 나타내고 있다.

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

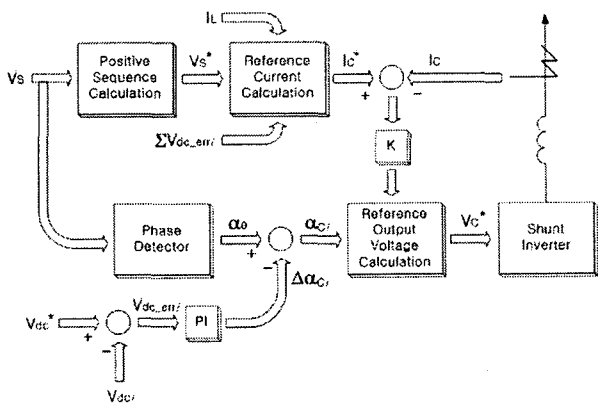


그림 4 병렬 컨버터의 제어블럭도
Fig. 4 Control block diagram of the shunt converter

그림 5는 병렬 컨버터의 APF 동작에 따른 고조파 전류 보상과형을 나타내고 있다. 부하전류에 대

해 전원전류는 거의 정현파에 가까움을 볼 수 있다.

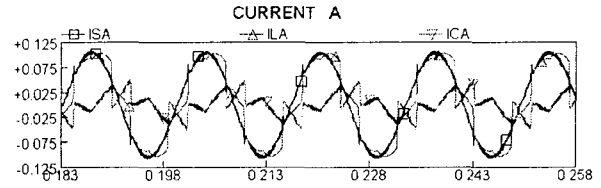


그림 5 병렬 컨버터의 APF 동작 모드
Fig. 5 APF operation of the shunt converter

직렬컨버터는 순간전압상승(swell), 순간전압강하(sag)와 같은 전압이상현상에 대하여 선로의 전압안정화를 유지하는 기능을 담당하고 있다. 정상성분 전압검출기로부터 연산된 정상성분전압은 이상적인 선로의 기준전압을 의미하며, 전원전압 이상현상 발견 시 정상성분전압과의 차에 의해 발생하는 전압성분이 결국 직렬 컨버터를 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 기본과 정상성분 전압보상과 차이가 있으며, 전압 V_S 의 모든 부분을 포함하는 보상성분을 나타낸다. 그림 6은 직렬 컨버터의 제어 블럭도를 보여준다.

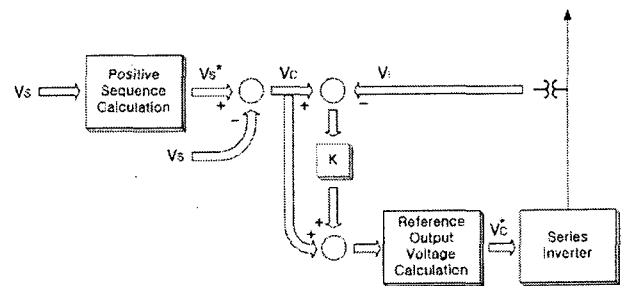
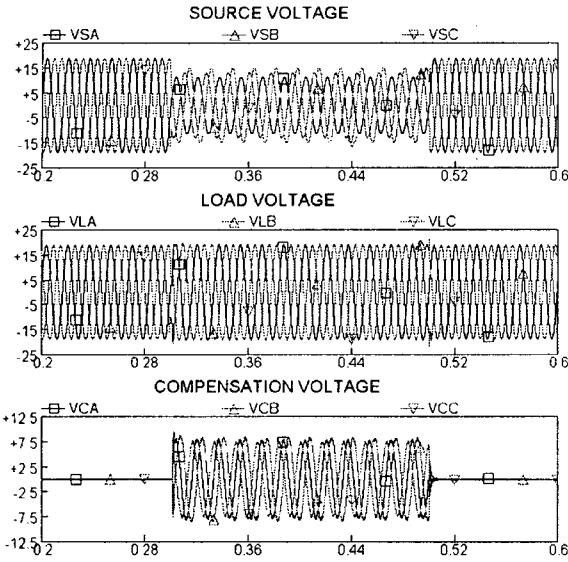


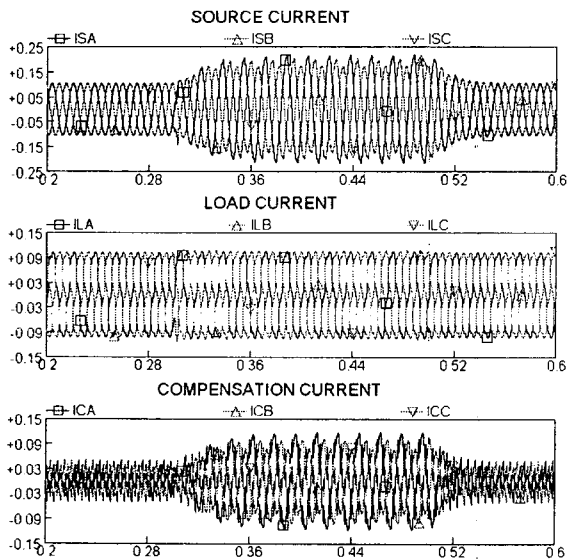
그림 6 직렬 컨버터의 제어블럭도
Fig. 6 Control block diagram of the series converter

그림 7은 배전선로의 전원 측 A, B, C상이 각각 40%, 30%, 20%의 sag가 발생하였을 경우에 따른 각 부의 파형을 나타낸 것이다. 그림 7(a)는 sag 발생 시 전원전압과 부하전압, 직렬인버터 보상전압을 나타내고 있으며, 7(b)는 전원전류, 부하전류, 병렬인버터 보상전류를 나타내고 있다. 정상시 UPQC는 병렬 컨버터를 통해 선로의 고조파 전류

를 보상하게 되며, sag 발생시에는 직렬 컨버터에 에너지를 공급하게 된다. 이때, 전원 측 선로의 전류가 병렬컨버터 쪽으로 급격하게 유입됨을 볼 수 있으며, 부하 측으로는 안정된 전력이 공급되어짐을 볼 수 있다.



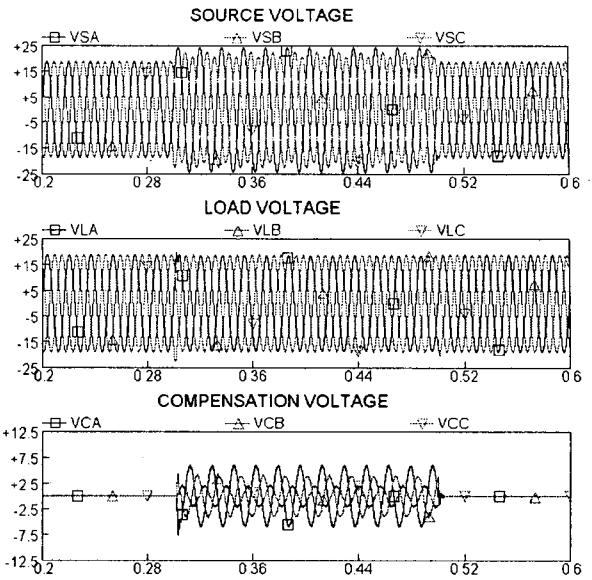
(a) 전원전압, 부하전압, 직렬인버터 보상전압



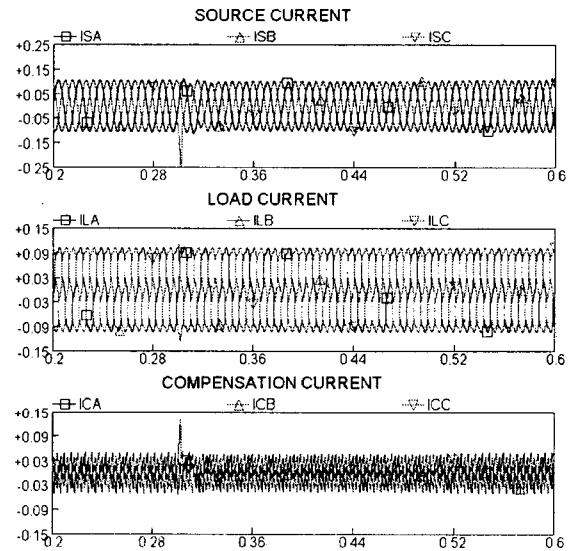
(b) 전원전류, 부하전류, 병렬인버터 보상전류

그림 7 전원전압 sag 모드 시 각부 결과파형
Fig. 7 Simulation results with voltage sag

그림 8은 배전선로의 전원 측 A, B, C상이 각각 30%, 20%, 10%의 swell이 발생하였을 경우에 따른 각 부의 파형을 나타낸 것이다.



(a) 전원전압, 부하전압, 직렬 컨버터 보상전압



(b) 전원전류, 부하전류, 병렬 컨버터 보상전류

그림 8 전원전압 swell 모드 시 각부 결과파형
Fig. 8 Simulation results with voltage swell

2.3 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 eupec에서 제공하는 듀얼 형태의 FF200R33KF2가 적합할 것으로 판단된다. FF200R33KF2는 3.3kV 200A 정격의 IGBT 스위칭 소자로서 안정적인 시

시스템의 운용을 감안할 경우 2.2kV 140A선이 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 축의 단상 다중변압기의 권수비는 8:1로 구성된다. 그림 9는 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.

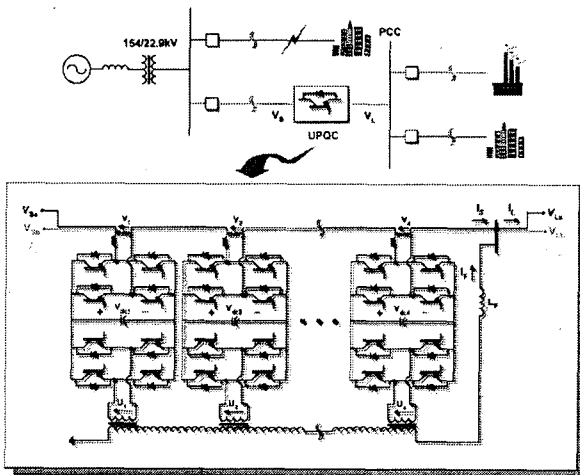


그림 9 시스템 구현을 위한 개념도
Fig. 9 Conceptual diagram for system realization

3. 결 론

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 단상 풀브리지 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 직렬주입 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.

참 고 문 헌

- [1] N. G. Hingorani, "Introducing Custom Power," IEEE Spectrum, June 1995, pp. 41-48.
- [2] H. Akagi, H. Fujita, "A New Power Line Conditioner for Harmonic Compensation in Power Systems," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 10, no. 3, July 1995, pp. 1570-1575.
- [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] Yunping Chen, Xiaoming Zha and Jin Wang, etc. "Unified Power Quality Conditioner(UPQC): The Theory, Modeling and Application", Power System Technology, 2000 proceedings. Power Con 2000. International Conference on, vol. 3, pp. 1329-1333, 2000.
- [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 Multibridge 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] 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.
- [10] 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.