

연료전지 시스템용 양방향 DC-DC컨버터 설계 및 제어

김성호*, 장한근*, 장수진*, 원충연*, 김윤호**
 성균관대학교*, 중앙대학교**

Bi-directional DC-DC Converter Design and Control for Fuel Cell System

Kim Sung Ho*, Jang Han Keun*, Jang Su Jin*, Won Chung Yuen*, Kim yoon ho**
 SungKyunKwan University*, Chung-Ang University**

ABSTRACT

Fuel Cell (FC) has slow response characteristic for load variation. During a load step, the inverter cannot pull more power from the fuel cell than is currently available so supplemental power must be provide by some sort of energy storage elements.

In this paper, bi-directional dc-dc converter for FC generation system is proposed to improve load response characteristic. The bi-directional converter interfaces the low voltage battery to the inverter dc link of FC generation system. The converter is based on a active full bridge in the primary side and on a half bridge in the secondary of a high frequency isolation transformer.

The complete operating principles and simulation results in presented.

1. 서 론

최근 대체에너지로서 관심을 받고 있는 연료전지는 기존의 DC전원과는 달리 강한 비선형성과 느린 동특성 및 낮은 출력전압의 특성을 갖기 때문에 기존의 전력 변환 장치를 그대로 이용해서는 연료전지를 운영하는데 상당한 문제점 및 어려움을 지니게 된다.

또한 연료전지는 수십~수백Watt/분의 매우 늦은 응답속도를 가지므로 부하 증가 시 배터리나 슈퍼캐패시터와 같은 별도의 에너지 저장장치로부터 필요한 전류를 공급하지 않으면 출력전압의 조절이 어렵다.

이에 따라 에너지 저장장치의 충/방전을 제어하고 에너지 및 전력을 제어하기 위한 DC/DC컨버터에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

연료전지 시스템에서 양방향 컨버터의 기능은 크게

두 가지이다. 평상시 계통의 잉여 전력을 직류 링크 캐패시터 전압으로부터 에너지 저장요소인 배터리에 전압원의 형태로 저장하고 유지하는 것이 첫 번째 기능이다.

순간 정전 시 에너지 저장 요소에 저장된 에너지를 직렬 또는 병렬 인버터에 연결된 직류 링크단에 적절히 방출하여 공급함으로써 직류 링크 캐패시터의 전압을 일정하게 유지하는 것이 두 번째 기능이다.^[1]

1차측(방전모드)은 MOSFET를 이용하여 액티브 클램핑 풀브리지 컨버터를, 2차측은 IGBT를 이용하여 하프브리지 컨버터로 1.5kW급 양방향 컨버터를 설계 제작하여 실험하였다.

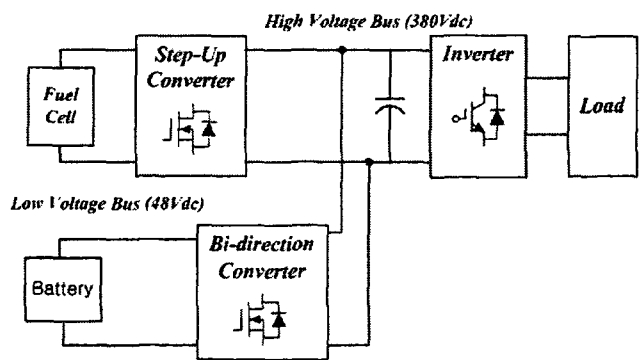


그림 1. 제안된 연료전지 발전 시스템
 Fig 1. proposed F.C generation system

2. 제안된 양방향 DC-DC컨버터

2.1 컨버터 토폴로지 비교

연료전지는 기존의 DC전원과는 달리 강한 비선형성과 느린 동특성 및 낮은 출력전압의 특성을 갖기 때문에 기존에 산업체에서 사용이 되어오던 전력 변환 장치를 그대로 이용해서는 연료전지를 운전하는

데 상당한 문제점 및 어려움을 지니게 된다.^{[2][3]}
 또한 연료전지용 전력변환기의 토폴로지는 연료전지의 출력전압, 용량 및 응용 분야에 따라 다양한 형태가 있기 때문에 설계자에 따라 최적의 방식을 선택하여야 한다.

다음 표는 각 컨버터의 장, 단점을 나타내고 있다.

표1. 각 컨버터 비교

Table 1. Comparison of converters

컨버터 토폴로지	스위치 개수	전압스트레스 (입력전압기준)	전류스트레스 (입력전류 기준)
푸시-풀	2	200%	100%
하프브리지	2	100%	200%
풀-브리지	4	100%	100%

표1에서는 비 절연 방식의 컨버터는 높은 승압비를 얻기 어려우므로 고주파 변압기를 사용하는 절연 방식을 주로 사용하였으며, 코아 이용률이 낮은 토폴로지에 대해서는 고려하지 않았다.

표2. 양방향 컨버터 조합

Table 2. Composition of bi-directional converter

조합	저 전압측	고 전압측
CASE 1	전류원 구조	전압원 구조
CASE 2	전압원 구조	전류원 구조

표2는 변압기 양측에 채택할 수 있는 컨버터 조합을 나타낸다.

두 가지 형태 모두 사용이 가능하나 배터리의 낮은 출력 전압을 승압하기 위해서는 고주파 변압기의 권수비를 낮게 하는 전류형 방식이 유리하다. 그리고 연료전지로부터 유입되는 스위칭 리플을 제거하기 위한 필터가 필요 없다는 장점이 있기 때문에 저전압측을 전류원 구조의 컨버터로 제작하였다.^{[1][4][5]}

절연형 풀브리지 컨버터는 스위치의 턴-오프시 스위치에 흐르던 전류가 변압기의 누설 인덕터에 의하여 갑자기 전류의 방향을 바꿀 수 없기 때문에 누설 인덕터에 의해 급격한 전압 변화가 생긴다. 이러한 갑작스런 전압의 증가는 소자의 파손을 가져올 수 있고 고주파 동작에서의 스위칭 손실을 발생 시키며 심각한 노이즈 발생의 근원으로 작용한다.

따라서 스위치를 오프하여 전류의 흐름을 차단할 때 전류가 흐를 수 있는 길을 마련해야 한다. 이러한 목적으로 스너버 회로가 제안 되었다.

그러나 저항과 캐패시터로 이루어진 RCD 스너버는 저항에서의 손실로 인하여 대전력 응용에는 적합하지 않다. 그리하여 스위치와 캐패시터로만 이루어진 능동 클램핑 회로가 제안되었다.^{[6][7]}

능동 클램핑 방법은 추가적인 스위치 소자를 쓰지 만 수동 클램핑 방법에 비해 회로 구현이 간단하며 효율이 좋아 연료전지 시스템과 같은 대전력 응용에 적합하다.^{[8][9]}

본 논문에서는 1.5kW급 양방향 컨버터를 설계 하고 제작 하였다.

1차측(방전모드)은 MOSFET를 사용하여 액티브 풀브리지 컨버터로 구성하고, 2차측(충전모드)은 IGBT를 사용하여 하프브리지 컨버터로 구성하였다. 그림2는 제안한 컨버터의 모습을 나타내고 있다.

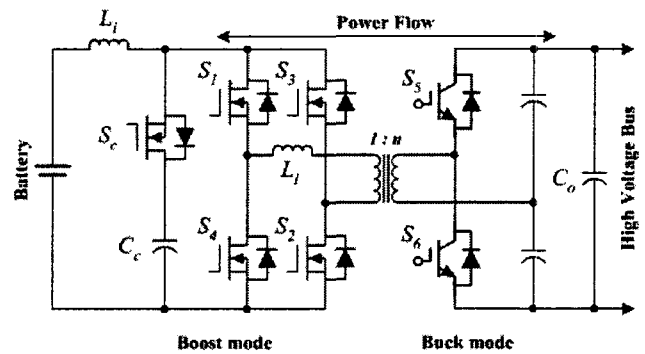


그림 2. 제안된 양방향 dc-dc 컨버터

Fig 2. Proposed bi-directional dc-dc converter

2.2 양방향 컨버터의 동작 특성

이 양방향 컨버터는 기본 풀브리지 컨버터에 하나의 클램핑 스위치와 하나의 클램핑 캐패시터가 추가된 형태이다.

이 컨버터의 주된 특징은 모든 스위치가 ZVS 동작을 하며, 스위치전압이 클램핑 캐패시터에 걸리는 전압으로 클램핑 된다.

양방향 컨버터는 1차측(저전압)에서 2차측(고전압)측으로 에너지가 전달될 때 방전(Boost Mode) 모드로 동작하게 된다. 주 스위치는 듀티 0.5 이상으로 동작하며 주 스위치가 모두 턴-온 일 때 에너지를 저장하고, 스위치(S1, S2)나 (S3, S4)가 턴-오프 될 때 2차측으로 에너지를 전달시킨다.

고주파 절연 변압기의 누설 인덕턴스와 스위치의 기생 캐패시터를 공진 요소로 사용하여 모든 스위치들이 ZVS 동작을 한다.

또한 변압기의 누설 인덕턴스와 2차측 다이오드의 기생 성분간의 링잉 및 오버슈트가 발생하지 않기 때문에 출력 측 다이오드의 전압정격을 낮출 수 있는 장점이 있다.^{[7][9]}

그림 3은 방전 모드일 때의 각부 파형을 나타내고 있다.

S_1 - S_4 는 주 스위치의 게이트 파형을 나타내고, S_c 는 보조 스위치의 게이트 신호를 나타내고 있다. i_{s1} 은 주 스위치에 흐르는 전류를, i_p 는 누설 인덕터에 흐르는 전류를 i_c 는 클램프 캐패시터에 흐르는 전류를 나타내고 있다.

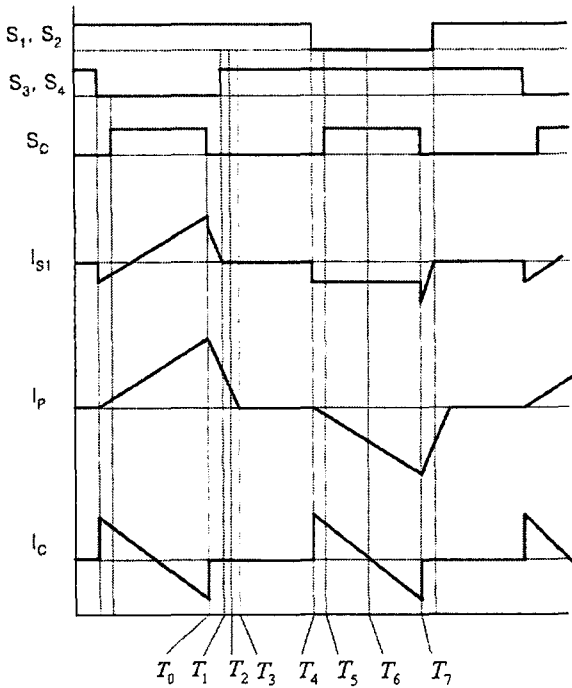


그림 3. 방전모드(Boost Mode)일 때 각부 파형
Fig 3. Timing diagram of Bi-directional converter in the Boost Mode

양방향 컨버터는 DC링크 전압이 380V 이상 일 때 2차측(고전압)에서 1차측(저전압)으로 에너지를 전달할 때 충전 모드로 동작한다.

연료전지가 부하를 충분히 공급하고 남은 잉여 전류는 1차측의 각 스위치의 기생 다이오드를 통해서 배터리를 충전시킨다. 연료전지는 에너지 발생장치로서 에너지 저장 능력이 없기 때문에 배터리와 같은 에너지 저장 장치가 필요하다. [7][10]

그림4는 양방향 컨버터가 방전 모드로 사용 될 때의 각부 파형을 나타내고 있다.

S_5, S_6 은 주 스위치의 게이트 파형을 나타내고, V_{s5} 는 스위치 S_5 에 걸리는 전압, i_p 는 충전 모드에서의 1차측 절연변압기에 걸리는 전류를, V_p 는 변압기에 걸리는 전압을 나타내고 있다.

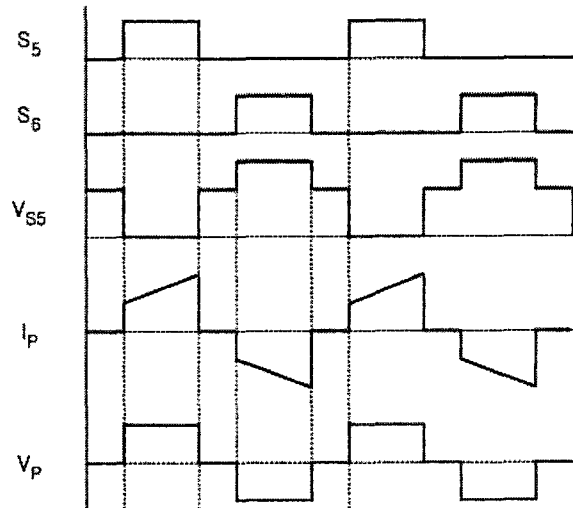


그림 4. 충전모드(Buck Mode)일 때 각부 파형
Fig 4. Timing diagram of Bi-directional converter in the Buck Mode

3. 시뮬레이션 및 실험 결과

표 3.의 파라미터 값을 이용하여 PSIM(6.0)으로 시뮬레이션을 하였으며, 1.5kW급의 양방향 컨버터를 설계 제작하여 실험 하였다.

그림5.는 양방향 컨버터의 시뮬레이션 회로도이다.

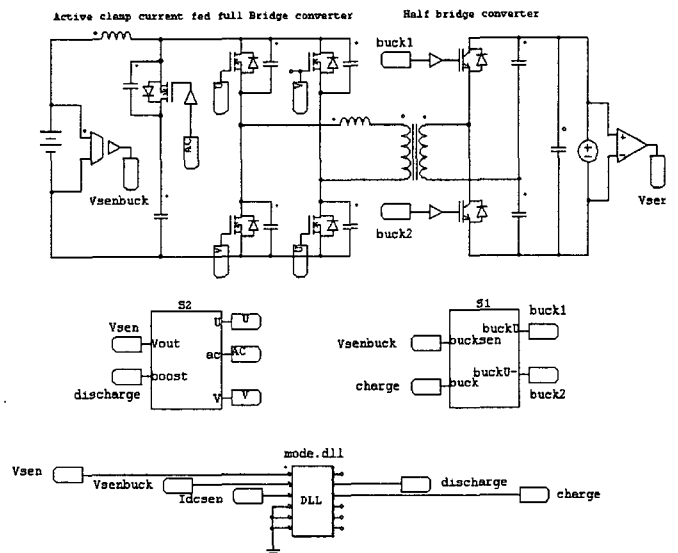


그림 5. 양방향 컨버터 시뮬레이션 블록도
Fig 5. The block diagram of Bi-directional converter's simulation

표3. 시뮬레이션 파라미터
Table 3. simulation of parameter

Clamp capacitance	3.5uF
Switching frequency	25kHz
High frequency transformer	1:3.5
Battery voltage(Low side)	48~55Vdc
Output voltage(High side)	380Vdc
Leakage inductance	13uH

표3은 시뮬레이션 및 실험에 사용된 파라미터 값이다.

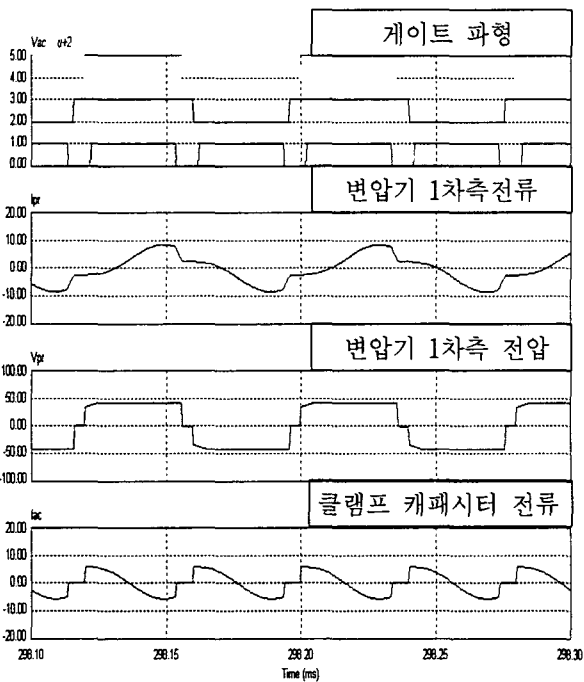


그림 6. 컨버터의 각부파형 [승압모드]
Fig 6.Simulation results at boost mode

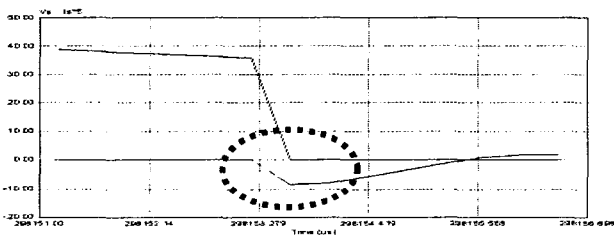


그림 7. 주 스위치 전압, 전류
Fig 7. Main switch's voltage and current

그림7의 스위치에 전류가 음으로 흐르는 파형은 스위치의 바디 다이오드를 통해서 전류가 흐르고 있음을 알 수 있다.

전류가 바디 다이오드를 통해서 흐를 때 스위치에 게이트 신호를 인가함으로써 영전압 스위칭 동작을 하게 된다.

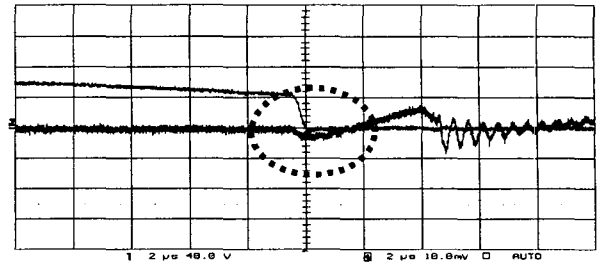


그림 8. 주 스위치 전압, 전류
Fig 8.Voltage and current of main switch

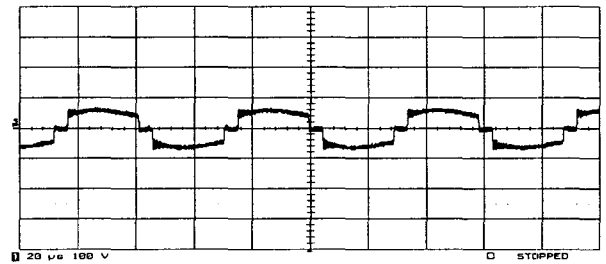


그림 9. 고주파 변압기의 1차측 전압[승압모드]
Fig 9.Transformer primary voltage(boost mode)
(100V/div, 20us/div)

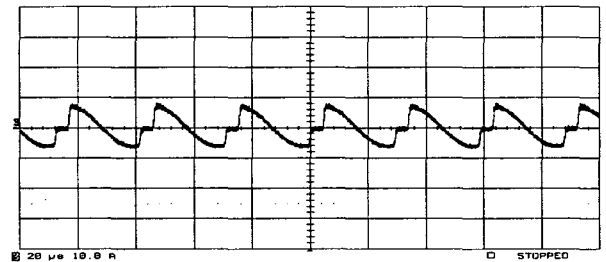


그림 10. 클램프 캐패시터 전류[승압모드]
Fig 10.Clamp capacitor's voltage(boost mode)
(10A/div, 20us/div)

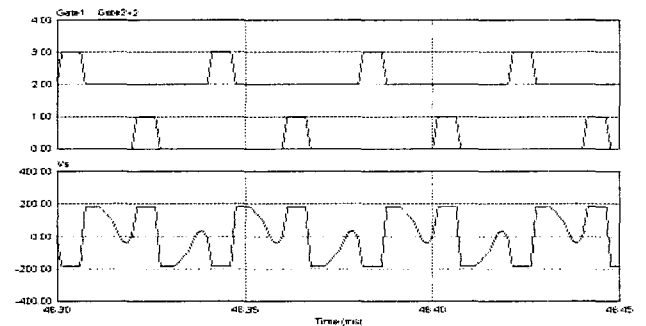


그림 11. 게이트 파형(상측), 2차측고주파변압기(하측)
Fig 11.Gating signals and transformer secondary wire volta(200V/div, 20us/div)

그림10, 그림11은 충전 모드일 때의 게이트 파형 및 2차측의 고주파 변압기의 파형을 나타내고 있다.

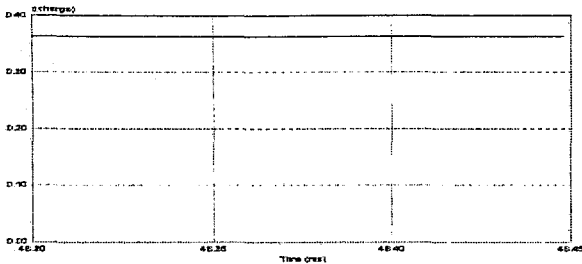


그림 12. 배터리 충전전류[충전모드]
Fig 12. Batter's charge current (buck mode)

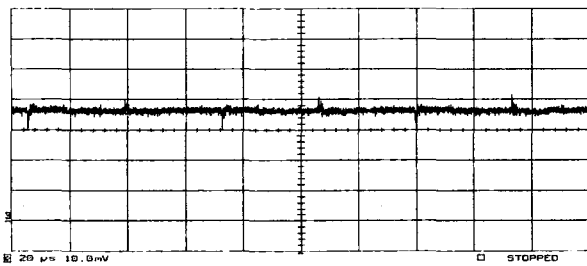


그림 13. 배터리 충전전류[충전모드]
Fig 13. Batter's charge current (buck mode)
(1A/div, 20us/div).

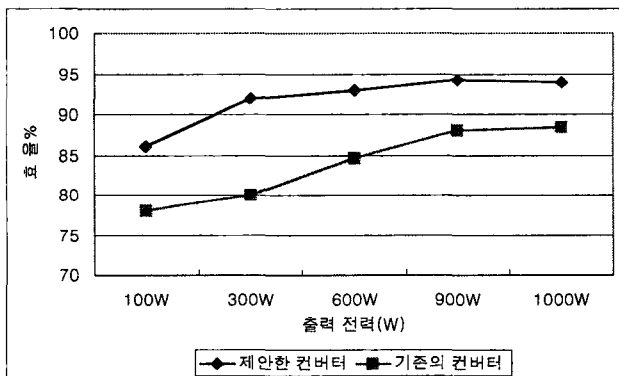


그림 14. 부하에 따른 측정 효율비교
Fig 14. Efficiency of output power

그림14는 출력전력에 따른 효율을 나타내고 있다. 기존의 컨버터와 비교해서 전 부하에 걸쳐 효율이 향상되었음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문은 양방향 컨버터의 최적 토폴로지 선정 및 고효율의 컨버터를 설계하여 다음의 결과를 얻었다.

- 1) 연료전지는 전류 리플에 큰 영향을 받기 때문에 입력 전류 리플을 적게 할 수 있는 전류형 컨버터의 적합성을 검증하였다.
- 2) 전압스트레스 및 스위칭 손실을 저감시켜 효율을 개선하였다.

3) 모든 스위치의 영전압 스위칭으로 인한 전압정격을 낮추었다.

제안된 양방향 컨버터는 향후 실제 연료전지 시스템에 결합하여 시스템의 적합성을 검증할 예정이다.

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라 구축지원사업으로 수행된 논문입니다.

참 고 문 헌

- [1] 최세완, "연료전지 발전 시스템에서의 전력전자 기술", 전력전자 학회 2003년 8월호 특집: 대체에너지 산업에서의 전력전자기술, pp.30-35.
- [2] E. Snati, E. Franzoni, A. Monti, D. Patterson, F. Ponci, and N. Barry, "A Fuel Cell Based Domestic Uninterruptible Power Supply," IEEE-APEC Conf. Rec., pp. 605-613, 2002.
- [3] M. W. Ellis, M. R. V. Spakovsky, and D. J. Nelson, "Fuel Cell Systems: Efficient, flexible Energy Conversion for the 21st Century," Proc. IEEE, pp.1808-1818, 2001.
- [4] M. Yamaguchi, T. Saito, M. Izumitani, S. Sugita, and Y. Tsutsumi, "Analysis of Control Characteristics Using Fuel Cell Plant Simulator," IEEE Trans. on Industrial Electronics, no.5, vol.37, pp.378-386, October 1990.
- [5] W. Choi, P. Enjeti, and J. W. Howze, "Fuel Cell Powered UPS Systems: Design Considerations," IEEE-PESC Conf. Rec., pp. 385-390, 2003.
- [6] W. Kunrong, F. C. Lee, and J. Lai, "Operation Principles of Bi-directional Full-bridge DC/DC Converter with Unified Soft-Switching Scheme and Soft-Starting Capability," IEEE-APECCConf. Rec., pp. 111-118, 2000.
- [7] L. M. Tolbert, W. A. Peterson, C. P. White, T. J. Theiss, and M. B. Scudiere, "A Bi-directional DC-DC Converter with Minimum Energy Storage Elements," IEEE-IAS Conf. Rec., pp. 1572-1577, 2002.
- [8] V. Yakushev, V. Meleshin, and S. Fraidlin, "Full-bridge Isolated Current Fed Converter with Active Clamp," IEEE-APEC Conf. Rec., pp. 560-566, 1999.
- [9] S. Yujin, and P. N. Enjeti, "A New Soft Switching Technique for Bi-directional Power Flow, Full-bridge DC-DC Converter," IEEE-IAS Conf. Rec., pp. 2314-2319, 2002.
- [10] T. Reimann, S. Szeponik, G. Berger, and J. Petzoldt, "A Novel Control Principle of Bi-directional DC-DC Power Conversion," IEEE-PESC'97, Conf. Rec., pp. 978-984, 1997.