

연료전지용 전류형 고주파 링크 DC-AC 컨버터

송유진, 정세교*

한국에너지기술연구원, *경상대학교 전기전자공학부

A Current-fed High Frequency Link Direct DC-AC Converter for Fuel Cell Power Source

Yujin Song, Se-Kyo Chung*

Korea Institute of Energy Research

*Department of Electrical Engineering, Gyeongsang National University

Abstract - 본 논문에서는 연료전지 전원시스템에 적합한 전류형 고주파 링크 DC-AC 컨버터를 제안한다. 제안된 전류형 고주파 링크 DC-AC 컨버터는 전류형 풀-브릿지 인버터, 능동 고조파 필터, 고주파 링크 변압기, 사이클로 컨버터로 구성된다. 1차측의 전류형 고주파 풀-브릿지 인버터는 정현파 PWM에 의해 변조된 전류펄스를 영전류 스위칭과 함께 발생시키고 두개의 양방향 스위치와 출력 필터 캐패시터만으로 구성된 사이클로 컨버터는 분리형 단상 60Hz 정현파 전압을 출력한다. 입력단에 연결된 능동 고조파 필터는 연료전지로부터 유기된 저고조파 전류를 배터리 또는 수퍼캐패시터같은 장시간의 에너지 저장장치 없이 제거한다.

1. 서 론

연료전지는 차세대 전기 유틸리티를 위한 중요한 에너지원으로 기대되고 있다. 연료전지에 대한 관심은 오염물질을 배출하지 않는다는 것뿐 아니라 기존의 발전시스템에 비해 상대적으로 높은 효율 때문에 점점 커지고 있다 [1-5].

연료전지의 중·소용량의 응용분야중의 하나가 가정용 전원시스템인데, 여기서는 전기적인 절연이 요구된다. 고주파 링크 전력변환기술은 이러한 응용분야에 적합하며, 이는 고주파 인버터, 고주파 링크 변압기, 사이클로 컨버터로 구성된 고주파 링크 DC-AC 컨버터가 전기적 절연뿐 아니라 DC 링크 캐패시터가 없는 콤팩트한 DC-AC 컨버터를 제작할 수 있는 방법을 제공함으로써 전력변환 단계를 줄여 고효율의 전력변환을 가능하게 하기 때문이다 [6,8].

가정용 연료전지 전원시스템은 연료전지의 낮은 직류 전압(36V~60V)으로부터 분리형 단상 120V_{rms} 또는 220V_{rms} 전압을 만들어내기 때문에 부스터 컨버터 또는 높은 승압비의 변압기가 필요하다 [9]. 전류형 DC-AC 컨버터는 벡모드와 부스터모드에서 동작하고 변압기의 평형을 쉽게 이룰 수 있기 때문에 저전압에서 고전압으로의 전력변환에 효과적인 방법이다. 또한, 전류형 컨버터는 인덕터가 입력단에 위치하기 때문에 더 작은 크기의 입력필터를 사용할 수 있다 [4,5]. 그러나 DC-AC 컨버터에 의해 연료전지로부터 유기되는 저고조파 전류를 제거하기 위해서는 여전히 큰 입력필터가 필요하다 [10]. 연료전지로부터 출력 주파수가 60Hz인 인버터에 유기된 가장 큰 고조파 전류는 120Hz 고조파 전류이며, 일반적으로 0.15 p.u. 즉, 정격전류의 15%로 제한된다 [11].

본 논문에서는 연료전지용 전력변환시스템을 설계하는데 있어 위와 같은 문제점을 해결하기 위해 새로운 능동 필터와 함께 전류형 고주파 링크 DC-AC 컨버터를 제안한다. 제안된 전류형 고주파 링크 DC-AC 컨버터는 연

료전지 직류전원으로부터 분리형 단상 교류전압을 줄어는 전력변환 단계를 통하여 출력한다. 능동필터는 전해질 캐패시터를 이용하여 연료전지로부터 유기된 120Hz 고조파 전류를 제거한다. 본 논문에서는 제안된 고주파 링크 DC-AC 컨버터의 동작원리와 제어기법을 상세히 서술하고, 다양한 시뮬레이션을 통하여 그 유용성을 증명하고자 한다.

2. 전류형 고주파 링크 DC-AC 컨버터

그림 1은 제안된 연료전지용 능동필터와 전류형 고주파 링크 DC-AC 컨버터이다. 입력 인덕터(L_s)와 역방향 방지용 다이오드가 있는 4개의 MOSFET(Q₁₋₄)으로 구성된 1차측의 전류형 고주파 인버터는 분리형 단상 PWM 정현파 전류펄스를 영전류 스위칭(zero current switching)과 함께 만들어서 고주파 링크 변압기를 경유하여 2차측으로 전송한다. 두개의 양방향 스위치(S₁, S₂)와 출력 필터 캐패시터(C_{an}, C_{bn})로 구성된 2차측의 사이클로 컨버터는 근사 영전류 스위칭(near zero current switching)으로 전류펄스를 정류하여 분리형 단상 60Hz 정현파 전압(V_{an}, V_{bn})을 출력한다. 능동필터는 배터리 또는 수퍼캐패시터 대신 전해질 캐패시터를 이용하여 보상 전류를 만들어 입력단에 흐르는 120Hz 고조파 전류를 제거한다. 능동필터의 다이오드 D_r와 캐패시터 C_r는 부가적인 클램핑 회로없이 고주파 인버터에서 전압 클램핑으로 사용된다. 제안된 컨버터는 간단한 구조와 함께 줄어든 전력변환단계, 쉬운 변압기의 평형 그리고 연료전지로부터 유기되는 120Hz 입력전류리플을 제거할 수 있는 효과적인 방안을 제시한다.

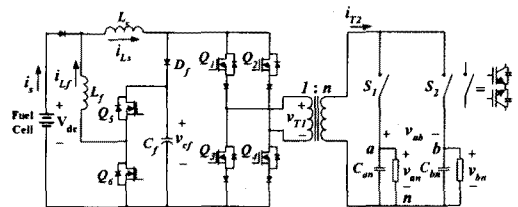


그림 1 제안된 전류형 고주파 링크 DC-AC 컨버터

제안된 전류형 고주파 링크 DC-AC 컨버터에는 3개의 동작모드 즉, 전송모드, 리셋모드, 복귀모드가 있다.

2.1 전송모드

대각선상의 두개의 스위치 쌍(Q₁과 Q₄ 또는 Q₂와 Q₃)이 영전류 스위칭과 함께 도통된다 (그림 2(a)). 입력인덕터

전류(i_{Ls})는 풀-브릿지 인버터에 의해 분리형 단상 정현파 전류펄스로 변조되어 2차측의 사이클로 컨버터로 전송된다. 사이클로 컨버터의 양방향 스위치는 변조된 AC 링크 전류와 출력전압의 극성에 따라 근사 영전류 스위칭과 함께 고정 듀티비로 도통된다.

2.2 리셋모드

구개의 상위 또는 하위 스위치(Q_1 과 Q_2 또는 Q_3 과 Q_4) 또는 4개의 스위치 모드 오픈된다 (그림 2(b)). 인덕터 전류(i_{Ls})는 다이오드 D_r 를 통해 캐패시터 C_f 를 충전한다. 일반적으로 기존의 전류형 컨버터에서는 플라이백 권선을 통해 리셋되는데, 이러한 접근방법은 인덕터가 복잡하고 순간적인 고전류가 흐르게 된다. 캐패시터 전압(V_{cf})는 능동필터가 동작할 때 스위치 Q_5 와 Q_6 에 의해 제어되며 입력전압(V_{dc})과 변압기의 1차측 전압(v_{T1})보다 항상 높게 유지된다.

2.3 복귀모드

인버터의 좌측레그 또는 우측레그의 두개의 스위치(Q_1 과 Q_3 또는 Q_2 와 Q_4) 또는 4개의 스위치 모두 영전류 스위칭과 함께 도통된다 (그림 2(c)). 따라서 인덕터 전류(i_{Ls})는 리셋모드에서 $(V_{dc}-v_{cf})/L_s$ 기울기로 감소하는 반면, 복귀모드에서는 V_{dc}/L_s 기울기로 증가한다.

따라서 1차측 전류가 2차측으로 전송되지 않는 구간에서 리셋모드와 복귀모드를 적절히 선택함으로써 인덕터 전류를 제어할 수 있다.

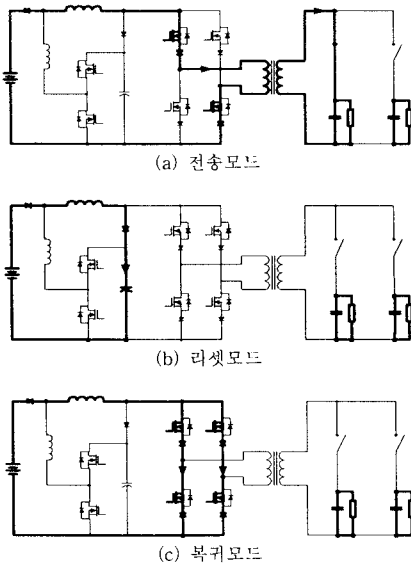


그림 2 전류형 고주파 링크 DC-AC 컨버터의 동작모드

3. 능동필터

DC-AC 컨버터의 입력과 출력은 순시치와 평균치에서 균형을 이루어야 한다. DC-AC 컨버터의 정현파 출력 전압과 전류는 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$v_o(t) = \sqrt{2}V_{rms} \sin \omega t \quad (1)$$

$$i_o(t) = \sqrt{2}I_{rms} \sin(\omega t - \phi) \quad (2)$$

ϕ : 역률각

순시전력을 식(1)과 (2)를 이용해 표현하면

$$P_o(t) = v_o(t)i_o(t) = V_{rms}I_{rms} - V_{rms}I_{rms} \cos(2\omega t - \phi) \quad (3)$$

이고, 평균전력은 다음과 같이 정의된다.

$$P_{av} = V_{rms}I_{rms} \cos \phi \quad (4)$$

일정한 입력전압 V_{dc} 에 대한 입력전류는

$$i_s(t) = \frac{V_{rms}I_{rms}}{V_{dc}} \cos \phi - \frac{V_{rms}I_{rms}}{V_{dc}} \cos(2\omega t - \phi) \quad (5)$$

이고, 식 (5)의 우변 두 번째 항이 120Hz 고조파 전류이다.

$$i_r(t) = -\frac{V_{rms}I_{rms}}{V_{dc}} \cos(2\omega t - \phi) \quad (6)$$

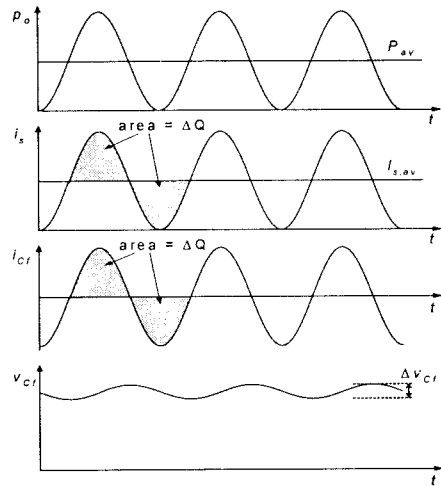


그림 3 출력전력, 입력전류, 캐패시터 전류, 전압 파형

본 논문에서 제안된 능동필터의 기본개념은 캐패시터 C_f 가 리플전류의 음의 반주기 동안 직류전원으로부터 전하 ΔQ 를 저장하고, 양의 반주기 동안 저장된 전하를 출력단으로 공급하는 것이다. 그림 3은 출력전력, 입력전류, 캐패시터 전류, 캐패시터 전압 파형을 나타낸다. 전하 ΔQ 는 리플전류의 반주기 면적과 같고 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Delta Q = \sqrt{2}I_{rms} / 60\pi \quad (7)$$

캐패시터 C_f 의 전압리플은 식 (7)을 이용해 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta v_{cf} = \Delta Q / C_f \quad (8)$$

그림 4는 능동필터의 동작모드를 나타내는데, 여기서 캐패시터 전압 V_{cf} 는 V_{dc} 와 v_{T1} 보다 높게 제어된다. 능동필터의 동작모드에는 벽모드와 부스모드가 있다. 벽모드에서는 스위치 Q_5 와 다이오드 D_6 가 도통되며 저장된 전하가 필터 인덕터 L_f 를 통해 출력단으로 공급된다 (그

림 4(a). 부스트모드에서는 인덕터 전류가 전원에서 캐패시터로 흐르고 캐패시터는 스위치 Q₆와 다이오드 D₆의 부스트 동작에 의해 충전된다.

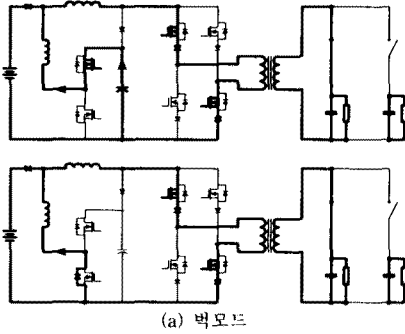


그림 4 능동필터의 동작모드

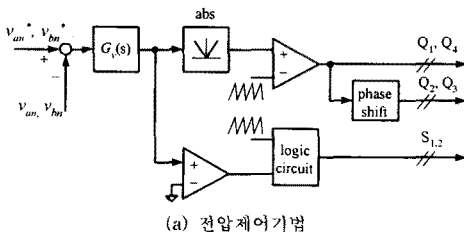
4. 제어기법

4.1 출력전압 제어

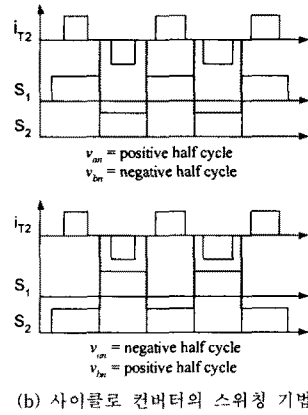
그림 5(a)는 전류형 고주파 링크 DC-AC 컨버터의 전압제어기법을 나타낸다. 출력전압은 폴-브릿지 인버터의 PWM에 의해 제어되고, G_v(s)는 전압제어루프의 게인으로서는 간단한 P제어가 사용된다. 사이클로 컨버터의 양방향 스위치 S₁, S₂는 제어입력과 AC링크전류의 극성에 따라 고정된 듀티비로 도통되며, 변압기의 누설전류 때문에 4-단계 커뮤테이션(4-step commutation)을 통하여 서로 전환된다(그림 5(b)). 입력 인덕터 전류는 리셋모드와 복귀모드를 적절히 선택함으로써 제어된다(그림 6). 전류 기준치는 평균전력(average output power)으로부터 계산되고 초기화 단자가 있는 적분기가 제어기로 사용된다. 리셋모드는 x_k>0 일때, 그리고 복귀모드는 x_k<0 일때 각각 선택된다.

$$x_k = \int_{(k-1)T}^{kT} [i^*_{Lr}(t) - i_{Lr}(t)] dt \quad (9)$$

T: 스위칭 주기



(a) 전압제어기법



(b) 사이클로 컨버터의 스위칭 기법

그림 5 전류형 고주파 링크 DC-AC 컨버터의 전압제어기법

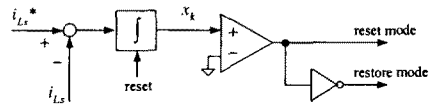


그림 6 입력 인덕터 전류 제어기법

4.2 능동필터 제어

그림 7은 능동필터의 제어 블록 다이어그램이다. 전류 기준치 i_{Lr}*는 평균전력 P_{av}로부터 계산된다. PI제어가 제어블록 G_r(s)로 사용되며, 제어입력은 PWM을 통해서 스위치에 적용된다. 벡모드는 양의 제어입력에 대해서, 부스트 모드는 음의 제어입력에 대해 선택된다. 스위치 Q₅는 벡모드에서 그리고 스위치 Q₆는 부스트모드에서 각각 제어된다.

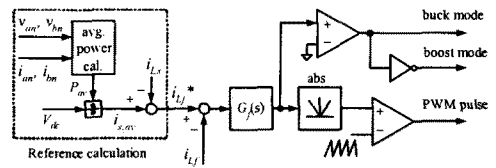


그림 7 능동필터의 제어 블록 다이어그램

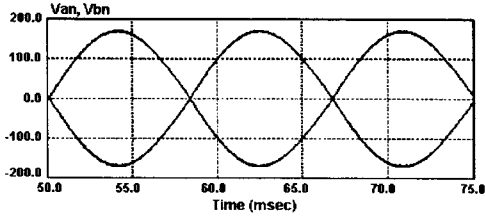
5. 설계 및 시뮬레이션 결과

제안된 컨버터의 타당성을 검증하기 위하여 다음과 같은 파라미터로 컨버터를 설계하여 시뮬레이션을 수행하였다.

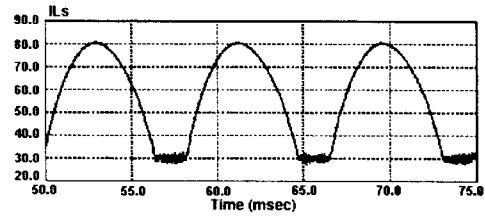
- 입력전압(V_{dc}): 42V
- 출력전압(v_{an}, v_{bn}): 120V_{rms}
- 출력 P_o: 1.5kW
- 스위칭 주파수(f_s): 20kHz
- 입력 인덕터(L_r): 500uH
- 능동필터 인덕터(L_f): 500uH
- 능동필터 캐패시터(C_f): 5600uF
- 출력필터 캐패시터(C_{an}, C_{bn}): 50uF
- 변압기 권선비(n): 4

그림 8은 제안된 고주파 링크 DC-AC 컨버터의 평형 부하(balanced load)에 대한 시뮬레이션 결과이다. 120Hz 고조파 전류는 제안된 능동필터에 의해 효과적으로 제거

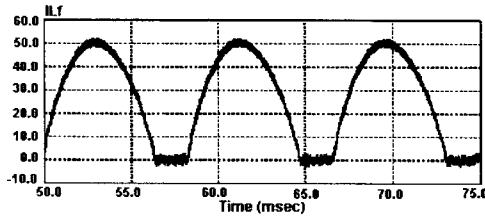
되고, 고품질의 출력전압을 얻을 수 있음을 보여준다. 그림 9와 그림 10은 불평형 부하(unbalanced load)와 비선형 부하(nonlinear load)에 대한 시뮬레이션 결과를 각각 보여준다. 제안된 전류형 고주파 링크 DC-AC 컨버터는 연료전지 전원으로 부터 고품질의 교류 출력전압을 한 단계의 전력변환으로 출력하고, 연료전지로부터 유기되는 저고조파 전류를 효과적으로 제거할 수 있음을 보여준다.



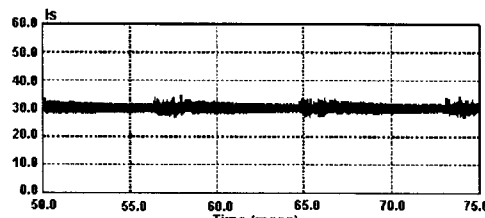
(a) V_{an}, V_{bn}



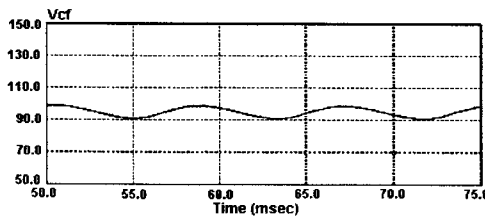
(b) i_{Ls}



(c) i_{Lf}

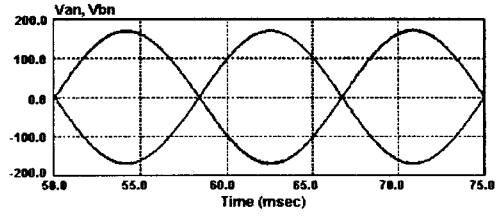


(d) i_s

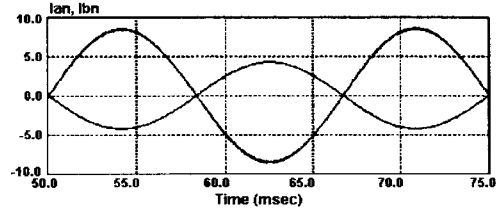


(e) v_{cf}

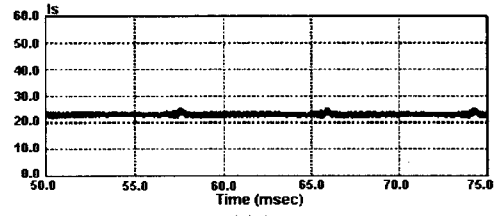
그림 8 평형 부하에 대한 동작파형



(a) V_{an}, V_{bn}

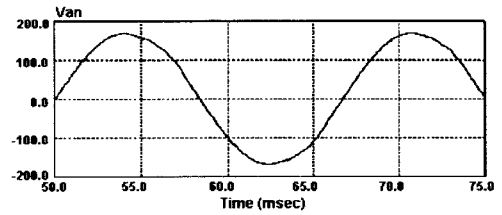


(b) i_{an}, i_{bn}

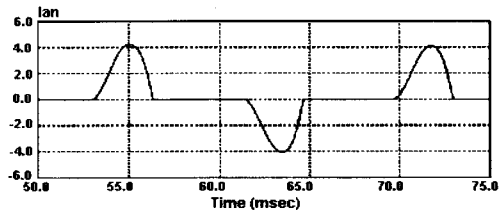


(c) i_s

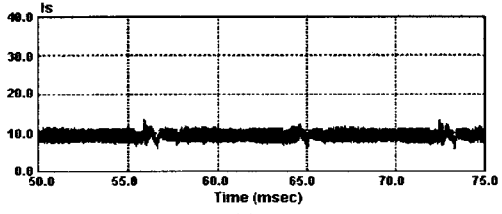
그림 9 불평형 부하에 대한 동작파형



(a) V_{an}



(b) i_{an}



(c) i_s

그림 10 비선형 부하에 대한 동작파형

6. 결 론

본 논문에서는 새로운 연료전지용 전류형 고주파 링크 DC-AC 컨버터를 제안하였다. 제안된 전류형 컨버터는 고품질의 분리형 단상 교류전압을 줄어든 전력변환단계로 출력하고, 전해질 캐패시터를 사용하는 능동필터는 연료전지로부터 유기되는 저고조파 전류를 효과적으로 제거하여 연료전지 시스템의 성능을 향상시킨다. 제시한 시뮬레이션 결과들을 통해 제안된 컨버터와 능동필터의 타당성을 증명하였다. 제안된 컨버터 구조는 콤팩트한 소용량의 가정용 연료전지에 적합한 저가형 전력변환장치로 적용 가능하다.

[참 고 문 헌]

- [1] M. Pagano, L. Piegari, "Electrical networks fed by fuel-cells for uninterruptible electrical supply," Proceedings of the ISIE, May 2002, Vol. 3, pp. 953-958
- [2] Dept of Energy, 2001 Future Energy Challenge Final Report, <http://www.energychallenge.org>
- [3] T. A. Nergaard, J. F. Ferrell, L. G. Leslie, and J.-S. Lai, "Design considerations for a 48V fuel cell to split single phase inverter system with ultracapacitor energy storage," Conf. Rec. IEEE PESC'02, pp. 2007-2012, 2002.
- [4] G. K. Andersen, C. Klumpner, S. B. Kjar, and Frede Blaabjerg, "A new green power inverter for fuel cells," Conf. Rec. IEEE PESC'02, pp. 727-733, 2002.
- [5] P. T. Krein and R. Balog, "Low cost inverter suitable for medium-power fuel cell sources," Conf. Rec. IEEE PESC'02, pp. 321-326, 2002.
- [6] I. Yamato, N. Tokunaga, Y. Matsuda, H. Amano, and Y. Suzuki, "New conversion system for UPS using high frequency link," Conf. Rec. IEEE PESC'88, pp. 658-663.
- [7] M. Matsui, M. Nagai, M. Mochizuki and A. Nabac, "High-frequency link DC/AC converter with suppressed voltage clamp circuits-naturally commutated phase angle control with self turn-off devices," IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 32, no. 2, March/April 1996.
- [8] Divan, D.M, "The resonant DC link converter- a new concept in static power conversion," IEEE trans. On Industry Applications, vol. 25, March-April 1989, p317-325
- [9] P. Tenti, L. Rossetto, L. Malesani, R. Borgatti, and R. Stefani, "Single-stage current-fed DC/DC converter with time-sharing control of output voltage and input current," IEEE Trans. Power Electr., vol. 5, no. 4, pp. 389-397, 1990.
- [10] Randall S. Gemmen, "Analysis for the effect of inverter ripple current on fuel cell operation condition," ASME 2001 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Nov.11-16, NY
- [11] DOE future energy challenge : 2001 and 2003, Low cost fuel cell inverter design competition : <http://www.energychallenge.org>
- [12] P. J. Wolf, K. C. Kwong, and G. F. Ledwich, "A single-phase converter with a high-frequency current-sourced link," IEEE Trans. Power Electr., vol. 7, no. 4, pp. 683-692, 1992.
- [13] K. Tazume, T. Aoki, and T. Yamashita, "Novel method for controlling a high-frequency link inverter," Conf. Rec. IEEE PESC'98, pp. 497-502, 1998.
- [14] T. Larsson, S. Ostlund, and F. Gustavson, "An active DC link filter for AC-AC converters," Conf. Rec. IEE Power Electronics. & Variable-Speed Drives, pp. 331-335, 1994.