

멀티레벨 인버터를 이용한 전기철도용 하이브리드 능동 전력필터

A Hybrid Active Power Filter for Electric-Railway Systems Using Multi-Level Inverters

김윤호¹ · 김수홍² · 이강희²
Yoon-Ho Kim · Soo-Hong Kim · Kang-Hee Lee

Abstract

This paper proposes transformerless power conversion system consisting of a single-phase diode rectifier and a shunt hybrid filter for the electric-railway system. The hybrid filter consists of a single tuned LC filter per a phase and a low-rated NPC type multi-level inverter. Compared with conventional active filters, transformers are not used. Also, LC filter works as not only a harmonic filter tuned at the 3rd harmonic frequency but also a switching-ripple filter. The rating of the active filter can be decreased by using a NPC type multi-level inverter. The simulation results confirm the validity of the system.

Keywords : Hybrid active power filter, Multi-level inverter, Electric-railway

1. 서론

전력변환 시스템에서 고조파는 심각한 문제를 야기한다. 국내 2, 3호선에서 SCR을 사용하는 전기철도용 전력 변환 시스템은 교류 전원 측에 대하여 고조파 발생원으로 작용하며, 전원으로 유입된 고조파는 많은 장애를 일으킨다. 종래에는 이들 전력시스템에서 발생하는 고조파를 감쇄하기 위해 일반적으로, LC로 구성된 필터를 사용하였다. 그러나 수동필터는 주전원 임피던스가 필터링 특성에 영향을 주고, 병렬공진으로 인해 고조파 전류증폭을 야기한다[1]. 낮은 시스템 전압은 과부하와 긴 급전선 영역(feeder section)에서 발생하고, 주로 인덕티브 급전선(inductive feeder) 임피던스를 통하여 흐르는 리액티브(reactive) 부하 전류에 의해 발생된다. 반면에, 급전선 임피던스를 통하여 흐르는 부하 전류의 고조파 성분은 정류된 평균 전압을 가진 왜곡된 집진기 전압파형(전자선과 전동차 접촉부를 통해 전동차에 유입되는 전원)의 결과로 인해 발생된다. 이것은 위상 제어된 철도 차량의 출력 전력은 실효값 보다 평균값에

비례하기 때문에 중요하다. 낮은 시스템 전압과 평균 전압의 손실은 전력을 감소시키고, 철도 차량의 성능을 감소시키게 된다. 공진 과전압과 같은 문제는 4상한 PWM구동으로 해결할 수 있으나, 사이리스터를 기본으로 하는 철도 차량은 고조파 과전압 문제가 야기된다[2]. 이러한 수동필터의 필터 특성을 개선시키기 위해 능동전력필터를 첨가한 하이브리드 필터를 제안하게 되었다. 하이브리드 필터에서, 수동필터는 부하에 의해 발생하는 고조파 전류를 억제하고 능동전력필터는 수동필터의 필터 특성을 개선시키는 역할을 한다[3]. 그러나, 일반적인 하이브리드 필터는 여전히 수동필터와의 결합을 위해 트랜스포머가 요구된다. 그리고 능동필터에 의해 발생하는 스위칭 리플을 제거하기 위해 수동필터가 요구된다.

본 논문은 병렬로 연결된 수동필터와 트랜스포머를 사용하지 않은 멀티레벨 인버터를 사용한 능동필터와 수동필터로 구성된 하이브리드 필터 시스템을 제안하였다. 본 논문에서 제안된 시스템은 일반적인 멀티레벨 인버터를 사용한 능동필터보다 필터에 작은 정격이 요구되고, 트랜스포머가 사용된 능동필터보다도 더 작은 정격이 요구된다. 능동필터의 전압-전류 정격을 크게 감소시킴으로써, 필터구성에 따

1 정희원, 중앙대학교 전자전기공학부, 교수
2 비희원, 중앙대학교 전자전기공학부, 박사과정

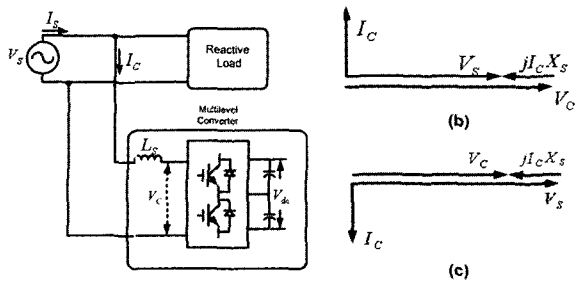


그림 1. 무효 전력 보상을 위한 멀티레벨 컨버터

(a)무효전력 보상을 위해 멀티레벨 컨버터와 연결된 전력 시스템의 회로다이아그램 (b)진상전류(Leading current) (c)지상전류(Lagging current)

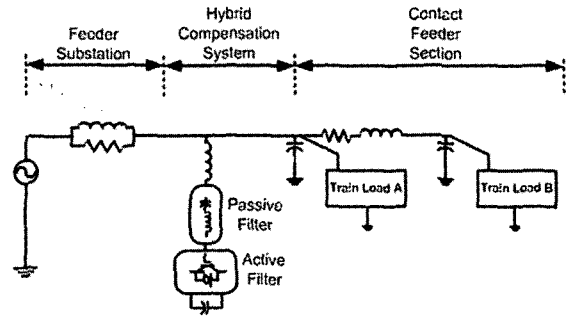


그림 2. 전기철도 시스템 모델

큰 비용 절감 효과도 기대할 수 있다. 또한, NPC타입 멀티레벨 컨버터는 컨버터 레벨이 증가할수록 고조파 크기가 감소되고, 무효전력 흐름 제어가 가능하며, 3레벨의 경우 다른 타입 컨버터에 비해 다이오드 수가 적게 든다는 장점을 가지고 있다[4]. 또한 멀티레벨 구조는 고전압 왜곡이나 스텝다운 트랜스포머가 없는 전송시스템에 직접 연결될 수 있다. 그림 1에서 보여주는 무효전력 보상을 위한 전력 시스템 회로에서 전압원 벡터 V_s 와 컨버터 전압 V_c 의 관계는 $V_s = V_c + jI_c X_s$ 와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 I_c 는 컨버터 전류 벡터이고, X_s 는 인덕터 L_s 의 임피던스를 나타낸다.

리액티브 전류의 방향과 크기는 DC단 전압과 스위칭에 의한 변조지수(MI : Modulation Index)의 함수인 컨버터 전압 V_c 의 크기에 의해 결정된다. 그리고 멀티레벨 컨버터는 전압불균형이 없는 리액티브 전력 보상에 주로 사용된다. 전원 전압이 일정하다면, 전류나 전력의 흐름은 컨버터 전압에 의해 제어될 수 있다. 또한, PWM인버터(type 1)와의 비교를 통하여 제안된 멀티레벨 컨버터(type 2)의 향상된 고조파 보상특성을 시뮬레이션을 통하여 입증하였다.

2. 시스템 구조와 NPC타입 멀티레벨 인버터

그림 2는 논문에서 제안한 하이브리드 보상 시스템을 갖는 전기철도 시스템 모델을 보여주고 있다. 전체 시스템은 입력 전원, 급전선 변전소(feeder substation), 급전선 접촉영역(contact feeder section), 하이브리드 보상시스템(hybrid compensation system) 으로 구성되었다. 하이브리드 보상시스템은 논문에서 제안한 것과 같이 수동필터와 능동필터는 직렬연결 구조를 가지고 있다.

2.1 하이브리드 필터 시스템 구조

그림 3의 (a)는 능동전력 필터와 수동필터가 병렬 연결된 시스템 구조를 보여주고 있으며 (b)는 직렬로 연결된 구조를 보여주고 있다. (a)는 능동필터에 높은 전압-전류 정격이 요구되며, (b)는 수동필터의 임피던스를 증가시켜 트랜스포머를 사용하지 않고 능동전력 필터의 전압-전류 정격을 줄일 수 있는 회로구조이다[5].

그러나 본 논문에서 제안한 멀티레벨 구조는 수동필터의 임피던스를 증가시켜 능동필터의 전압-전류 정격을 줄이는 동시에, 능동전력 필터의 각 소자 전압 정격감소 효과도 얻을

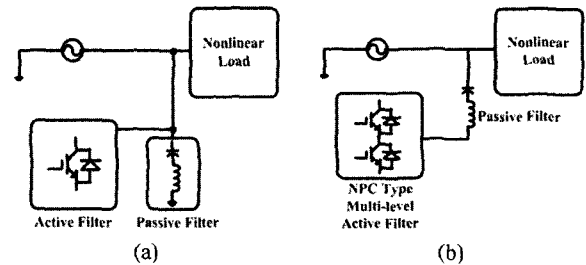


그림 3. 하이브리드 필터 구조

(a)병렬연결 하이브리드 필터(type 1) (b)직렬연결 하이브리드 필터 (type 2)

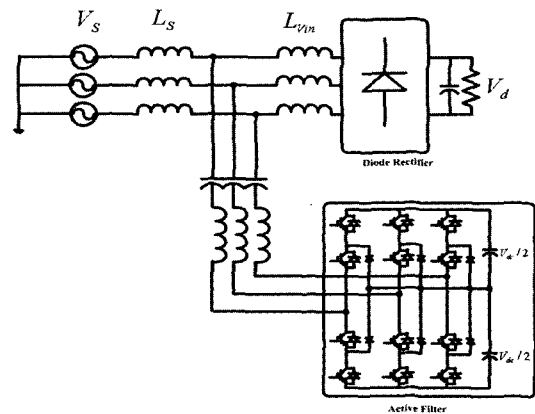


그림 4. 제안된 하이브리드 필터 구조

수 있다. 멀티레벨컨버터 구조를 사용하여 입력단 전류 기본파의 크기를 증가시켜 결과적으로 하이브리드 필터단 전압-전류의 정격을 크게 감소시킬 수 있다. 제안된 하이브리드 필터구조는 그림 4에서 보여주고 있다. 멀티레벨 스위칭 제어 방법은 제어의 복잡성을 가진 SPWM대신 멀티캐리어 스위칭 방법을 사용하여 제어 방법의 복잡성을 해결할 수 있었다[6].

2.2 NPC멀티레벨 컨버터

그림 5는 NPC타입 멀티레벨 컨버터 구조를 보여주고 있다. 인버터 입력단 DC링크 커패시터 전압은 각각 $V_{dc}/2$ 이고, 이는 일반적인 PWM인버터에 비해 각 소자 전압 스트레스를 $V_{dc}/2$ 로 줄일 수 있음을 의미한다. 각상의 스위칭 동작은 서로 상보형으로 동작하며(S_{a1}, S_{a3})(S_{a2}, S_{a4}), 레벨이 증가할수록 각 소자 전압 스트레스는 줄어든다는 것을 알 수 있다. 또한 증가된 레벨에 의해 출력 파형은 정현파에 가까워지므로, 고조파를 감소시키고 무효전력 흐름제어가 가능하게 된다.

2.3 멀티 캐리어 PWM 스위칭 방법

멀티 레벨 PWM방법은 일반적으로 안정상태에서 DC링크 전압과 전류 고조파 제어에 많은 장점을 지닌 SVPWM(공간벡터 PWM)과 멀티 캐리어 PWM 스위칭 방법을 사용한다. 그러나 SVPWM은 레벨 증가에 따른 공간 판별이 어렵고 제어가 복잡하다는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 제어가 간편한 멀티 캐리어 PWM방법을 사용하였다. 멀티 캐리어 PWM은 m레벨컨버터는 m-1개의 캐리 신호를 필요로 하고, 기준 신호는 각 캐리 신호와 비교되어 스위칭 파형을 출력한다. 만약, 기준 신호가 캐리신호보다 클 경우 능동 소자는 턴-온 되고 캐리신호보다 작으면 턴-오프 된다. 멀티레벨 컨버터의 진폭 변조 지수는 m_a , 주파수비는 m_f 라 정의하면 아래와 같이 표현할 수 있다[5].

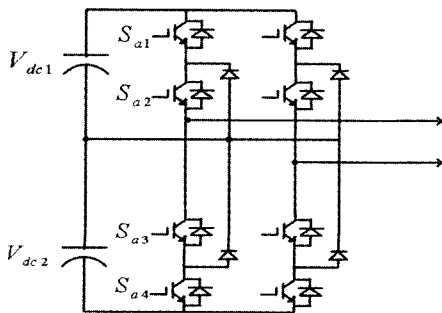


그림 5. 단상 NPC멀티레벨 컨버터 구조

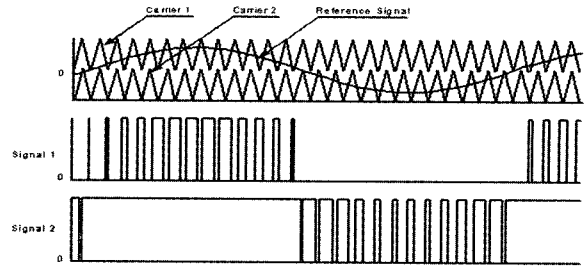


그림 6. 멀티캐리어 스위칭 방법

$$m_a = \frac{A_m}{(m-1) \cdot A_c}$$

$$m_f = \frac{f_c}{f_m} \quad (1)$$

여기서, f_c 는 캐리 신호 주파수이고 A_c 는 캐리 신호의 최대 값이고, f_m 은 기준 신호의 주파수이고 A_m 은 기준 신호의 최대 값이다.

그림 6은 3레벨 컨버터에서의 멀티캐리어 스위칭 방법을 보여주고 있다. 스위칭 입력 신호(signal 1,2)는 하나의 기준 신호(reference signal)와 두개의 캐리신호(carrier 1,2)와 비교되어 발생되었다. 본 논문에서는 스위칭 소자를 위한 PWM 게이트 신호를 발생하기 위해 기준 신호는 10kHz의 캐리신호와 비교되었다.

3. 시스템 제어기법

그림 7은 시스템 제어 블록 다이어그램을 보여주고 있다. 능동필터는 입력 전류와 부하 전류를 각각 피드백 제어(feed-back control)와 피드-포워드 제어(feed-forward control) 방법으로 검출한다. 또한 능동필터는 외부의 전력 공급 없이 dc전압을 발생시키며, LC수동필터는 3차 고조파 주파수에 동조되었다.

제안된 시스템은 LC수동필터의 임피던스를 가능한 작게 만들 수 있다. 이것은 좋은 필터링 특성과 능동필터의 각 소자정격을 줄일 수 있다는 것을 의미한다. 부하는 인덕티브 부하 또는 커패시티브 부하로 가정할 수 있다. 그림 7(b)에서 능동필터의 전압원은 V_{ch} 이상적인 전류원은 I_{Lh} , Z_f LC수동필터의 임피던스를 나타낸다. 만약 능동필터가 연결되지 않으면 입력 전원 전압은 일정하고 전원원 전류 I_{sh} 는 아래의 수식에 의해 정현파가 제공된다.

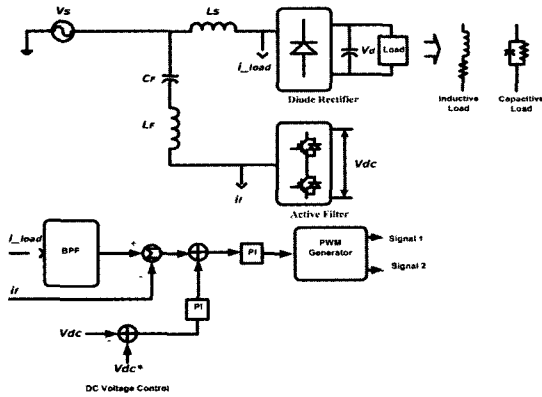
$$I_{sh} = \frac{Z_f}{sL_s + Z_f} I_{Lh} \quad (2)$$

여기서, I_{sh} , Z_F , I_{Lh} 는 각각 입력 전류, 수동필터 임피던스, 부하 전류를 나타낸다. 만약, 입력 임피던스 $W_h L_s$ 가 필터 임피던스 Z_F 보다 훨씬 작다면 좋은 필터링 특성을 기대할 수 없다. 또한 입력 전류 I_{sh} , 필터 단자전압 V_{th} , 능동필터 출력 전압 V_{Fh} 는 아래 수식에 의해 주어진다.

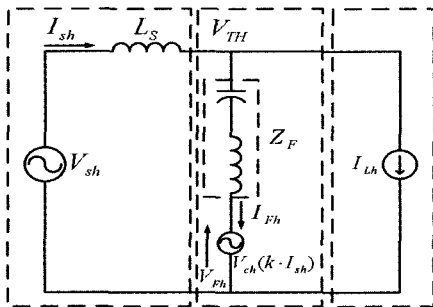
$$\begin{aligned} I_{sh} &= \frac{Z_F}{K + sL_s + Z_F} I_{Lh} \\ V_{TH} &= -\frac{sL_s Z_F}{K + sL_s + Z_F} I_{Lh} \\ V_{Fh} &= \frac{KZ_F}{K + sL_s + Z_F} I_{Lh} \end{aligned} \quad (3)$$

만약, $K \gg |Z_F|$ 이면, 부하로부터 유입된 모든 고조파 전류는 LC필터로 유입된다. K가 무한히 크다면 이상적인 필터 특성은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_{sh} &= 0 \\ V_{TH} &= V_{sh} \\ V_{ch} &= Z_F I_{Lh} + V_{sh} \end{aligned} \quad (4)$$



(a)시스템제어 블록다이어그램



(b)시스템 등가회로

그림 7. 시스템 제어 블록 다이어그램과 시스템 등가회로

일반적으로 PWM컨버터의 능동필터에 요구되는 전압-전류정격은 독립적으로 사용되는 능동필터 보다 더 작다. 그러나 제안된 멀티레벨 능동 전력필터의 전압-전류정격은 PWM 컨버터 능동필터보다 더 작게 만들 수 있다. 만일 능동필터의 전압-전류정격이 동일하다고 가정하였을 경우, 전압정격은 멀티레벨을 사용함으로써 각 소자의 전압정격을 1/2로 줄일 수 있다. 또한 멀티레벨을 사용하여 입력 기본파 전류의 크기를 증가시켜 필터단 전류를 감소시킴으로, 필터단 전류 정격 줄일 수 있다. 부하측 전류가 일정할 때 입력 전류의 크기를 증가시키면, 상대적으로 필터단 전류를 감소시킬 수 있다. 필터단 전압-전류 정격은 시뮬레이션을 통하여 증명하였다.

4. 시뮬레이션 결과

표 1에서는 제안된 NPC멀티레벨 인버터 회로에 사용된 파라미터를 보여주고 있다. 전기철도용 입력전압은 25kV이나 본 논문에서는 약 1/10배인 2.4kV를 기준으로 시뮬레이션을 수행하였다. 수동필터는 3고조파 주파수 180Hz에 동조되었고, 능동 전력 필터의 스위칭 주파수는 10kHz이다.

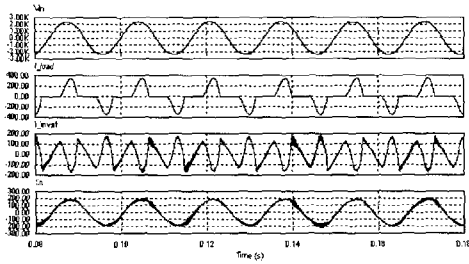
트랜스포머를 사용하지 않은, 능동전력필터단의 정격을 감소시키기 위해, 입력 인덕턴스 필터 인덕터 임피던스보다 필터 인덕터 값이 최소한 10배 이상은 커야한다. 게다가, 수동필터단의 낮은 인덕터는 능동전력필터를 불안정하게 한다. 그림 8은 표 1에 나타낸 파라미터를 이용하여 PWM인버터구조(type 1)와 NPC멀티레벨 인버터(type 2)를 사용하였을 경우에 따른 회로 출력파형을 보여주고 있다. 그림에서 Vin은 전원단 전압(2.4kV), I_load(400A)는 비선형 부하 출력 전류, I_invaf(200A)는 능동필터에서 출력된 고조파 보상파형, Iin(200A)은 전원단 공급 전류를 나타낸다.

그림 9는 PWM인버터와 멀티레벨 능동전력 필터를 사용하였을 경우에 따른 전원 전류 FFT 분석을 보여주고 있다.

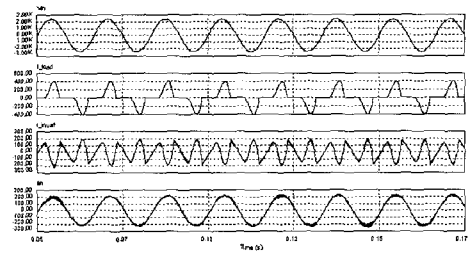
그림 10은 능동필터의 각 스위칭 소자 양단 전압을 보여준다. (a)는 PWM인버터를 사용하였을 경우이고 (b)는 제안된 멀티레벨 능동전력 필터를 사용하였을 경우이다. 그림에

표 1. 회로 파라미터

Supply Voltage	2400 V
Line Frequency	60 Hz
Power System Inductance Ls	0.3 mH
Filter Capacitor	195.4 uF
Filter Inductor	4 mH
DC Bus Voltage of the active filter	480 V

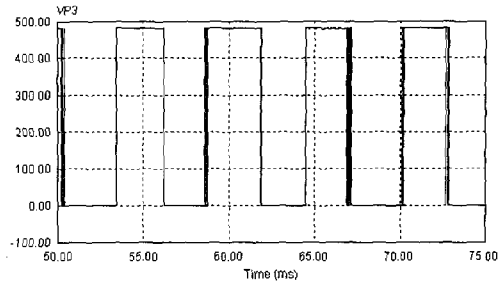


(a) PWM 인버터(type 1) 출력파형

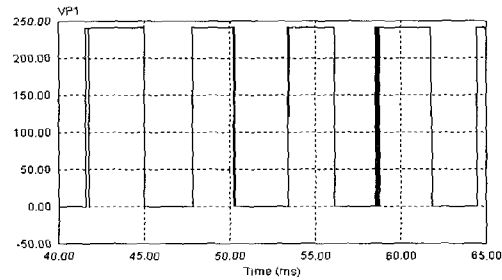


(b) 제안된 멀티레벨 능동 필터(type 2) 출력 파형

그림 8. 능동전력필터의 출력파형

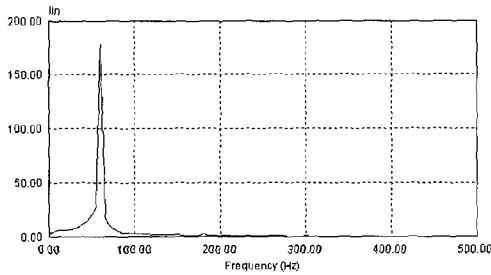


(a) PWM 인버터(type 1)

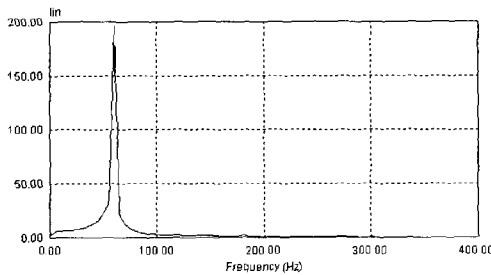


(b) 멀티레벨 능동전력필터(type 2)

그림 10. 능동필터 각 스위칭 소자 양단 전압



(a) PWM 인버터(type 1)



(b) 멀티레벨 능동 전력필터(type 2)

그림 9. 전원 전류 FFT 분석 파형

서 알 수 있듯이 멀티레벨 인버터를 사용하였을 때, 각 소자 전압 정격을 1/2로 줄일 수 있고, 입력단 인덕턴스와 필터 인덕턴스의 비율에 의해 트랜스포머를 사용하지 않고도 능동필터 전압정격을 줄일 수 있다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문은 전기철도용 전력변환장치에 사용가능한 트랜스포머를 사용하지 않은 하이브리드 필터구조를 제안하였다. 또한 하이브리드 필터는 LC수동필터와 낮은 전압-전류 정격을 가진 NPC타입 멀티레벨 컨버터로 구성되었고, LC수동 필터는 3차 고조파 주파수에 동조되었으며, 스위칭 리플을 제거하였다. 제안된 하이브리드 필터는 트랜스포머를 사용하지 않고 낮은 정격을 가진 능동전력 필터 구성이 가능함을 보여주었고, 일반적인 PWM인버터로 구성된 능동필터보다 스위칭 소자의 전압-전류 정격 감소와 향상된 필터링 특성을 보여주고 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2002-000-00497-0) 지원으로 수행되었음.

참고 문헌

1. Rivas, D.; Moran, L.; Dixon, J.W.; Espinoza, J.R. "Improving passive filter compensation performance with active techniques" *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 2003, Pages:161-170

2. Tan, P.C.; Loh, P.C.; Holmes, D.G.; "A robust multilevel hybrid compensation system for 25kV electrified railway applications" PESC '03. IEEE 34th Annual Conference on , Volume:3 , 15-19 June 2003, Pages:1020-1025 vol.3
3. Libano, F.B.; Simonetti, D.S.L.; Uceda, J.; "Frequency charac-

- teristics of hybrid filter systems" PESC '96 Record., 27th Annual IEEE, 2 ,June 1996, Pages:1142-1148 vol
4. Jih-Sheng Lai; Fang Zheng Peng; "Multilevel converters-a new breed of power converters" Industry Applications, IEEE Transactions on, 1996 Pages:509-517