

고속철도 차량용 PWM 컨버터의 전원전압 변동에 강인한 제어

Robust Control against Voltage Source Variation for PWM Converters of the High Speed Traction

박병건*
Park, Byoung-Gun

이우철**
Lee, Woo-Cheol

현동석***
Hyun, Dong-Seok

ABSTRACT

High-speed traction has voltage source variation because the electric power of tractions is supplied by difference traction power system according to operating section. This paper proposes the robust control maintaining constant output performance against voltage source variation for PWM converters of the high speed traction. The proposed scheme consists of feed-forward compensation for current controller by on-line calculating the rms voltage of voltage source. Total dynamic performance of high speed traction can be improved by the reduction of the output voltage ripple which is resulted from voltage source sag and variation. The superior performance and validity of the proposed scheme is proved through the simulation.

1. 서 론

최근 환경에 대한 관심이 고조되면서 전기 에너지를 사용하는 고속 철도에 대한 관심이 전 세계적으로 증가하고 있다. 이러한 관심의 증가로 고속철도에 대한 기술이 발전하여 열차의 고속화가 선진국을 중심으로 활발히 추진되고 있다. 고속철도 시스템의 전력변환 시스템은 입력보다 더 큰 출력을 얻을 수 있는 승압형 PWM 컨버터를 사용하며 대 전류를 공급하기 위해 병렬로 구성하여 사용된다. 일반적으로 고속철도 차량용 PWM 컨버터는 부하에 따른 진상 및 지상운전을 통한 고역률 운전이 가능하며 전력의 흐름이 양방향으로 제어되어 구동 및 회생운전을 할 수 있다. 대용량의 단상 PWM 컨버터는 스위칭 주파수에 제한을 가지고 있기 때문에 PWM 컨버터의 병렬 운전 시 두 컨버터의 스위칭 시점에 차이를 둬으로써 유효 스위칭 주파수를 증가시키면서 동시에 입력 전류의 고조파 성분들을 저감시키는 Interlacing 기법을 사용한다 [1].

* 한양대학교 전기공학과 박사과정, 정회원
E-mail : redalarm@hanyang.ac.kr
TEL : (02)2220-0341 FAX : (02)2220-0570
** 한경대학교 전기공학과 교수, 비회원
*** 한양대학교 전기공학과 교수, 정회원

이 기법은 n개의 컨버터가 병렬 운전할 때에 각 컨버터의 삼각파의 반송파 위상이 서로 π/n 만큼 위상차가 나게 배치하는 것으로 두 컨버터 운전 시 90도의 위상차를 가지고 제어하여 컨버터 입력 측의 전류파형을 보다 정현파에 가깝게 함으로써 고조파를 감소시킬 수 있으며 유효 스위칭 주파수는 컨버터의 단독 운전에 비하여 2배로 증가시킬 수 있다. 또한 PWM 컨버터의 병렬운전은 출력 측 전압의 변동 폭을 줄일 수 있으며 컨버터 용량도 증대시킬 수 있는 장점을 가지고 있다 [2-4].

고속 철도 차량의 급전 시스템은 컨버터의 고조파 특성과 전원 공급선의 분할과 운행 차량이 계통 구간을 움직이기 때문에 철도 차량에 전원의 품질을 유지하는 것이 어렵다. 또한, 고속 철도 차량은 운행 구간에 따라서 다른 급전 시스템에서 전기를 공급받기 때문에 철도 차량은 전원전압의 변동이 크게 나타나며, 판토품이 전력선을 위한 필터에 연결이 되어 있는 경우 과도상태에서 전압이 크게 변할 수 있다. 이러한 전원 전압의 변동은 견인 전동기를 구동하기 위한 전력변환 시스템에 문제를 발생하여 전체적인 고속철도 차량의 동특성을 저하시키는 문제를 발생한다[5].

본 논문은 전원 전압의 변동에도 출력 특성을 유지할 수 있는 고속철도 차량용 PWM 컨버터의 강인한 제어 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 실시간으로 전원 전압의 실효치를 계산하여 전원전압 변동 시 빠르게 검출하여 전류 제어기에 전향 보상한다. 이를 통해 고속철도 차량의 전원 구간 변동이나 전압 강하로 인해 발생하는 출력 전압의 변동을 줄임으로써 전체적인 철도 차량의 동특성을 향상시킬 수 있다. 제안한 방법의 우수한 성능과 타당성은 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

2. 단상 병렬형 AC/DC PWM 컨버터

고속철도용 단상 병렬형 PWM 컨버터는 그림 1과 같이 구성되어진다. 컨버터 시스템은 스위칭 소자인 IGBT와 역병렬 환류 다이오드, 그리고 승압용 인덕터가 제거된 변압기 2차 측 누설 인덕턴스로 구성되어 있으며 컨버터의 출력 측은 일정한 직류 전압을 공급하기 위하여 큰 용량을 가지는 커패시터로 연결되어 있다.

그림 1의 단상 병렬형 PWM 컨버터에 관한 전압 방정식은 식 (1)과 같이 나타내어진다.

$$\begin{bmatrix} V_{sA} \\ V_{sB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_{lsA} & 0 \\ 0 & R_s + pL_{lsB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sA} \\ i_{sB} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{cA} \\ V_{cB} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, $p = d/dt$ 이고 R_s 는 변압기 2차 측 권선 저항이다.

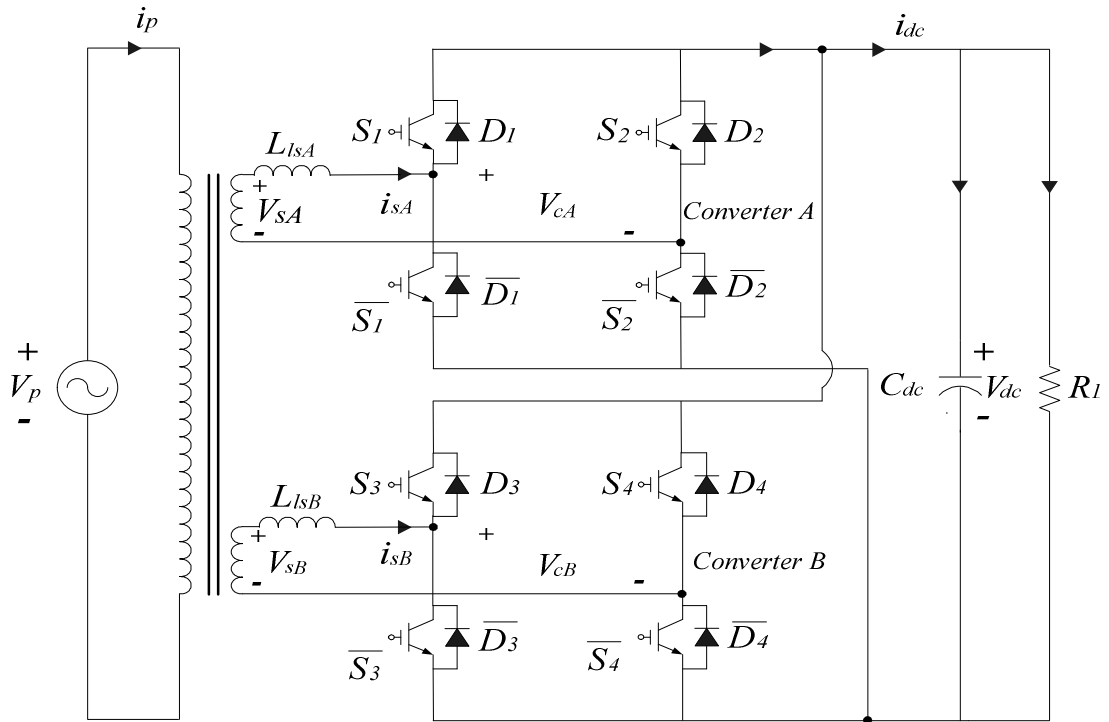


그림 1 단상 병렬형 AC/DC PWM 컨버터 시스템
 Fig. 1 Single-phase parallel PWM converter system

컨버터 입력 전압 V_{cA} , V_{cB} 는 식 (2)와 같이 스위칭함수 S_A , S_B 와 출력 전압 V_{dc} 에 의해 결정되어진다. 컨버터 A와 컨버터 B의 스위칭 함수 S_A , S_B 는 $-1, 0, 1$ 의 값을 갖는다.

$$\begin{cases} V_{cA} = (S_1 - S_2) V_{dc} = S_A V_{dc} \\ V_{cB} = (S_3 - S_4) V_{dc} = S_B V_{dc} \end{cases} \quad (2)$$

PWM 컨버터의 출력전류는 식 (3)과 같이 컨버터의 스위칭 함수들과 입력 전류 i_{sA} , i_{sB} 에 의해 결정되어진다.

$$i_{dc} = S_A i_{sA} + S_B i_{sB} \quad (3)$$

PWM 컨버터의 출력 전압은 식 (4)에 의해 계산되어진다.

$$C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = i_{dc} - \frac{V_{dc}}{R_L} \quad (4)$$

식 (1)에서 (4)로부터 병렬형 PWM 컨버터의 상태 방정식이 식 (5)와 같이 구성된다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_{dc} \\ i_{sA} \\ i_{sB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_L C_{dc}} & \frac{S_A}{C_{dc}} & \frac{S_B}{C_{dc}} \\ -\frac{S_A}{L_{lsA}} & -\frac{R_s}{L_{lsA}} & 0 \\ -\frac{S_B}{L_{lsB}} & 0 & -\frac{R_s}{L_{lsB}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{dc} \\ i_{sA} \\ i_{sB} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{V_{cA}}{L_{lsA}} \\ \frac{V_{cB}}{L_{lsB}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

3. 제안한 전원전압 보상 방법

단상의 전원 전압은 다음과 같은 식으로 정의한다.

$$v_p = V_{\max} \sin \omega t \quad (6)$$

여기서 v_p 는 전원전압의 실효치이며, V_{\max} 는 최대 값이다. 단상 전원의 기본 주파수 60[Hz]이므로 $\omega=2*\pi*f$ 으로 나타낼 수 있다. 위의 전원 전압에 위상이 90도 뒤진 다른 허상을 만들어 내기 위해 시간으로 계산하면, 전체 주기 시간은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$T_s = \frac{1}{f} = \frac{1}{60} = 16.6 [ms] \quad (7)$$

이러한 전체 시간에 대해 90도 위상이 뒤진 시간을 구하면 4.15[ms]로 계산할 수 있으며 식 (7)에 t 대신에 $t+0.00415$ 를 이용하여 새로운 허상을 만들어 낼 수 있다. 이러한 두 값을 좌표변환하여 d,q축의 전압 전원을 만들어 내며, 이 계산된 값만큼 시간적인 차를 이용하여 식은 다음과 같이 d-q축의 회전좌표계로 변환한다.

$$\begin{bmatrix} V_{s_d} \\ V_{s_q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{s_\alpha} \\ V_{s_\beta} \end{bmatrix} \quad (8)$$

위 식을 이용하여 구한 V_{sd} 와 V_{sq} 를 이용하여 RMS값을 구하면 다음 식과 같다.

$$V_s = \frac{\sqrt{V_{s_d}^2 + V_{s_q}^2}}{\sqrt{2}} \quad (9)$$

이 값은 전원전압의 변화를 실시간으로 추정할 수 있으며, 추정된 값을 이용하여 전원 전압

의 변화에 대한 전류 값으로 계산하여 기준 전류값에 전향보상하여 출력 특성을 향상 시킬 수 있다. 제안한 전원전압 보상 방법에 대한 전체적인 구성은 그림 2와 같다.

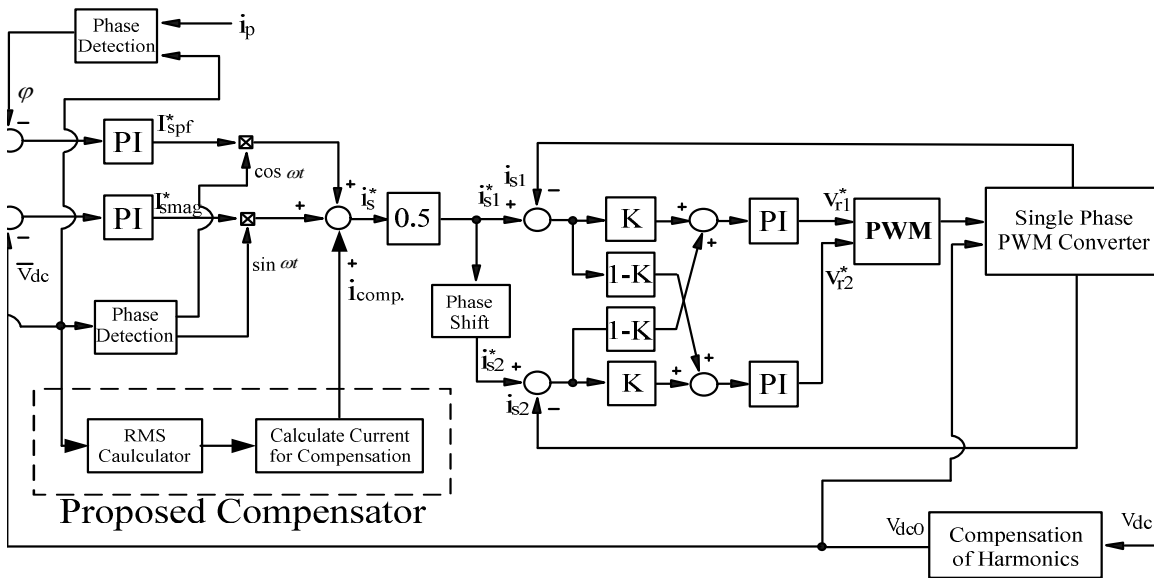


그림 2 제안한 보상을 포함한 전체적인 시스템
 Fig. 2 Overall System with proposed compensator

4. 시뮬레이션 결과

제안한 전원 전압변동에 대한 보상 방법에 대한 타당성을 검증하기 위해 Psim을 이용한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에서 고려된 시스템 파라미터들은 표 1에 주어져 있다.

표 1 시스템 파라미터
 Table 1 System Parameter

구 분	값
변압기의 1차/2차 측 전압 (V_p/V_c)	25[KV] / 1400 [V]
출력 전압(V_{dc})	2800 [V]
1차 측 누설인덕턴스(L_p)	0.8 [mH]
2차 측 누설 인덕턴스 (L_{lsA}, L_{lsB})	2 [mH]
스위칭 주파수 (f_{carr})	540 [Hz]
상호 인덕턴스 (L_m)	20 [mH]
1차 측과 2차 측 권선 저항(R_p, R_s)	0.016 [Ω]
KVA 정격	2 [MVA]

그림 3은 제안한 실효값 추정을 이용한 결과를 나타낸다. 전원 전압은 고속철도의 전원 전압에 대한 규정을 고려하여 입력 전압이 25kV에서 20kV로 떨어진 조건에서의 실효값 추정이 잘 이루어 지고 있음을 알 수 있다.

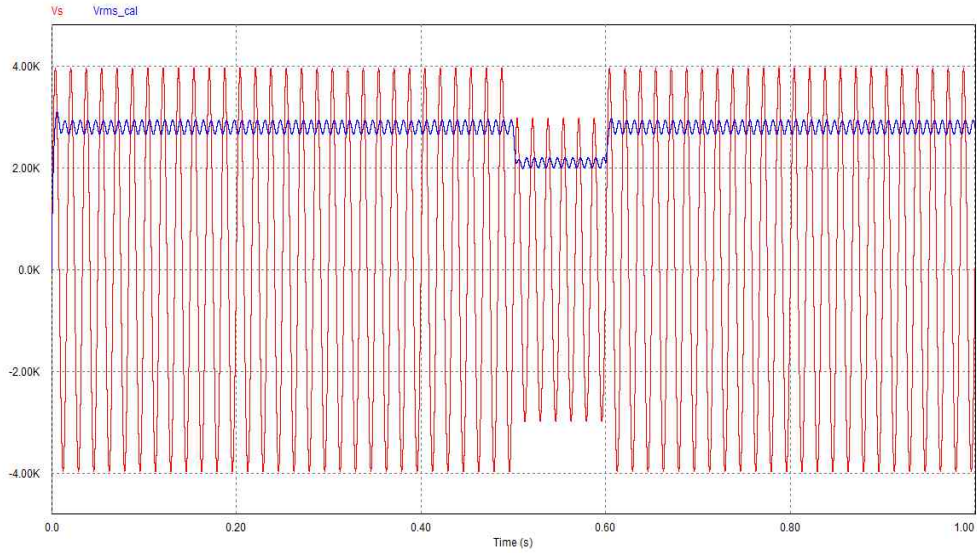


그림 3 전원전압과 추정된 실효값
Fig. 3 Voltage Source and estimated rms value

그림 4는 이러한 전원전압 변동이 발생하였을 경우에 대한 전원전압 검출에 의한 보상이 포함되지 않은 시스템에 대한 출력전압 파형을 나타낸다.

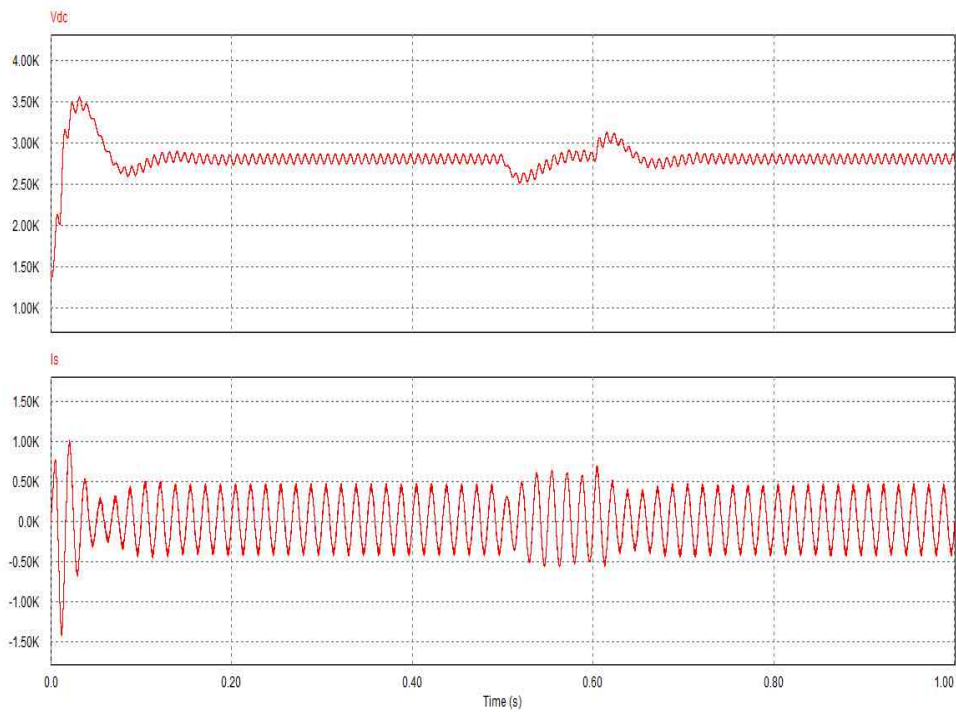


그림 4 보상기 없이 컨버터 출력전압과 입력 전류
Fig. 4 Output voltage and input current without compensator

그림 5는 이러한 전원전압 변동이 발생하였을 경우에 대한 전원전압 검출에 의한 보상을 포함한 시스템에 대한 출력전압 과형을 나타낸다. 보상기 없는 시스템 출력에 비해 크게 향상되지는 않았지만 출력 전압의 저하를 줄인 것을 볼 수 있다. 보상을 위한 정확한 값을 추정하여 반영한다면 더 좋은 결과를 얻을 수 있다.

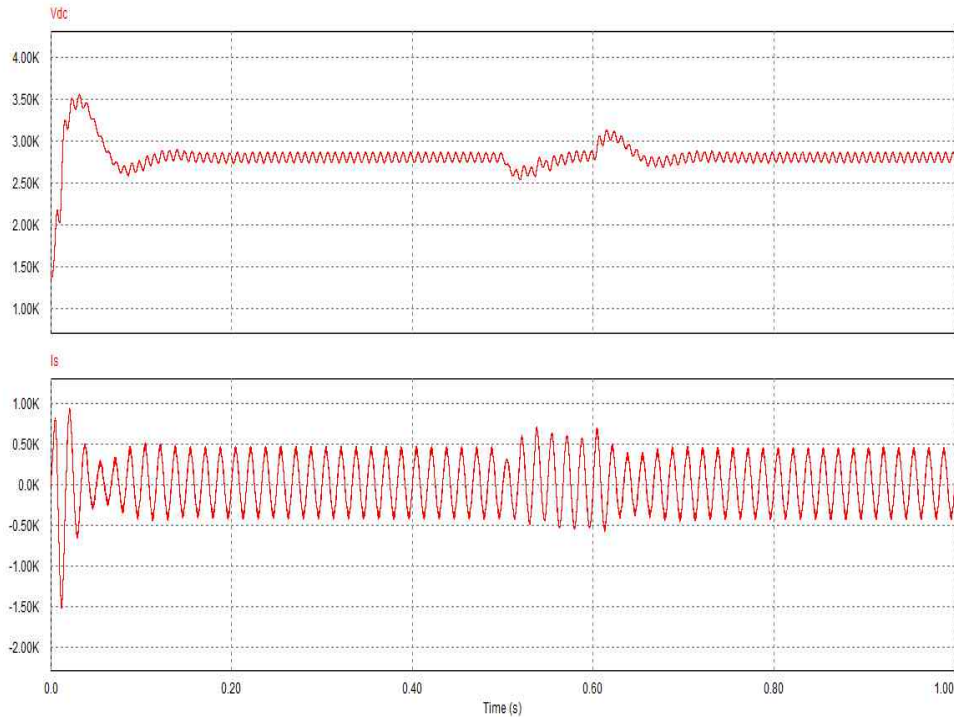


그림 5 보상기를 추가한 컨버터 출력전압과 입력 전류
 Fig. 5 Output voltage and input current with compensator

5. 결 론

본 논문은 전원 전압의 변동에도 출력 특성을 유지할 수 있는 고속철도 차량용 PWM 컨버터의 강인한 제어 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 실시간으로 전원 전압의 실효치를 계산하여 전원전압 변동 시 빠르게 검출하여 전류 제어기에 전향 보상한다. 이를 통해 고속철도 차량의 전원 구간 변동이나 전압 강하로 인해 발생하는 출력 전압의 변동을 줄임으로써 전체적인 철도 차량의 동특성을 향상시킬 수 있다. 제안한 방법의 우수한 성능과 타당성은 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원(과제번호 07차세대고속철도A01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Shen. J., Taufig. J. A., and Mansell. A. D. "Analytical solution to harmonic characteristics of traction PWM converters," *IEE Proceedings on Electronic Power Applications*, vol. 144, no. 2, pp. 158-168, 1997.
- [2] Stihl. O. and Boon-Teck Ooi, "A single-phase controlled-current PWM rectifier," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 3, no. 4, pp. 453-459, Oct 1998.
- [3] Christopher K. Duffey et al, "Update of Harmonics Standard IEEE-519 : IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonics Control in Electronic Power System", *IEEE Transactions on Industrial Applications*, Vol. 25, Issue 6, pp.1025-1034, Nov.-Dec. 1989
- [4] 이현원, 장성영, 김연준, 이광주, "IGCT를 이용한 단상 PWM정류기 병렬운전", 전력전자학회 논문지, Vol. 5, No. 2, pp.11-18, 2000년 2월.
- [5] J.O. Krah and J. Holtz, " Total Compensation of Line-Side Switching Harmonics in Converter-Fed AC Locomotives," *IEEE Trans. on Industry Application*, Vol. 31, No. 6, Nov. 1995