

변압기 2차측 LLC 직렬공진컨버터 적용 승압형 DC/DC 컨버터

이현관, 이기식, 정봉근, 공영수, 김은수⁺, 차인수^{*}, 윤정필^{*}
전주대학교⁺, 동신대학교^{*}

The Secondary LLC Series Resonant Converter for the Boost DC/DC Converter

Hyun-Kwan Lee, Gi-Sik Lee, Chung-Bong Geon, Young-Su Kong, Eun-Soo Kim⁺
In-Su Cha^{*}, Jeong-Phil Yoon^{*}
Jeon-Ju University⁺, Dong-Shin University^{*}

ABSTRACT

Recently, the high frequency isolated boost DC/DC converter has been widely used for the PCS (Power Conditioning System) system because of its small size and low cost. However, the high frequency isolated boost DC/DC converters applied the conventional voltage-fed converter and current-fed converter have the problems such as the high conduction losses and the surge voltage due to the high circulating current and the leakage inductance, respectively. To overcome this problems, in this paper the secondary LLC resonant converter is proposed, and the experimental results of the secondary LLC series resonant converter for boost DC/DC converter are verified on the simulation based on the theoretical analysis and the 1kW experimental prototype.

1. 서론

최근에 PCS(Power Conditioning System)는 고집적화 및 고기능화를 통해 소형화 및 단가 저감하는 추세에 있다. 따라서 PCS 시스템에 적용되는 승압형 DC/DC 컨버터 또한 소형화 및 단가저감을 위해서 고주파 승압형 DC/DC 컨버터가 꾸준히 증가되어 왔다. 낮은 입력전압(22VDC~30VDC)에서 높은 출력전압(400VDC)으로 승압하는 고주파 승압형 DC/DC 컨버터들 중 검토 될 수 있는 주회로는 일반적으로 전압형 컨버터(Voltage-fed Converter)와 전류형 컨버터(Current-fed converter)로 나눌 수 있다. 이러한 고주파 승압형 DC/DC 컨버터는 절연된 높은 전압으로 승압하기 위해서 변압기의 높은 턴수비가 필요하게 되고 이에 따라 변압기의 누설인덕턴스 증가로 순환전류에 따른 도통 손실 증가와 서지 전압 등으로 직류 승압 컨버터는 낮은 효율 특성을 갖게 된다. 따라서, 본 논문에서는 이를 보완한 새로운 변압기 2차측 LLC 직렬공진컨버터 적용 승압형 DC/DC 컨버터를 제안하였다. 이에 대한 이론적 해석 및 시뮬레이션을 통해 1kW급 시제품을 제작하여 실험 결과에 대해 서술하였다.

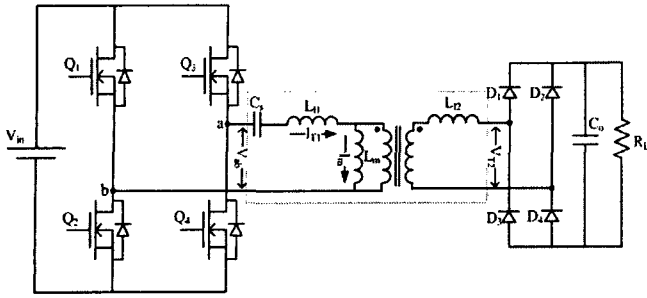
2. 제안된 변압기 2차측 LLC 직렬 공진컨버터 적용 승압형 DC/DC 컨버터

본 논문에서는 승압모드와 강압모드 둘 다 동작될 수 있고, 상대적으로 좁은 주파수 제어범위에서 넓은 범위의 입·출력 전압제어를 할 수 있으며, 스위칭 동작영역에서 모든 스위칭소자들이 소프트 스위칭 할 수 있는 등의 여러 장점들을 갖고 있는 고효율 LLC 직렬 공진컨버터 적용 승압형 DC/DC 컨버터를 제안하였다. 제안된 LLC 직렬 공진컨버터는 고주파 스위칭 동작에 있어 몇 가지 장점을 가지고 있다. 첫 번째는 크기와 부피를 줄일 수 있고, 두 번째는 스위칭 손실과 고조파 성분을 줄일 수 있으며, 세 번째는 높은 효율특성을 얻을 수 있다.

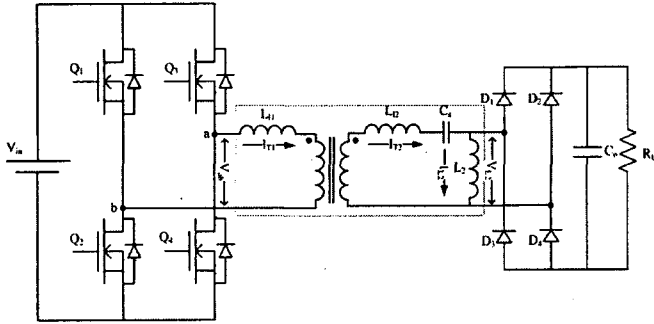
하지만, 본 논문에서 적용하고자 하는 LLC 직렬 공진컨버터는 낮은 입력전원(22VDC~30VDC)에서 높은 출력전압(400VDC)으로 전압을 승압시켜 동작되므로 그림 1(a)의 LLC 직렬 공진컨버터와 같이 공진요소인 직렬 공진커패시터를 1차측에 사용하게 되면, 1차측에 흐르는 대전류로 인해 직렬공진 커패시터가 열화 되어 특성이 저하될 수 있고, 커패시터 크기 증가에 따른 고집적화의 어려움 및 적용 단가 상승 등 여러 문제점이 따른다.

따라서, 이러한 문제점을 개선하기 위해 본 논문에서는 그림 1(b)와 같이 LLC 직렬공진 컨버터의 공진요소를 변압기 2차측에 위치시켜 직렬공진을 위한 직렬커패시터(C_s)의 크기 및 단가를 저감 할 수 있었고, 변압기 자화인덕턴스(L_m : Magnetizing Inductance)를 가능한 크게 하기위해 변압기에 갭(Gap)을 두지 않았으며 1차측 누설인덕턴스(L_{l1})는 최소화하고 2차측 누설인덕턴스(L_{l2})를 증가시켜 직렬공진요소로 이용하였다. 특히, 변압기 1차측 Bridge 주 스위칭소자의 영전압 스위칭을 위한 전류를 흐르도록 하기 위해 변압기 2차측에 병렬 인덕터(L_2)를 추가하여 LLC 직렬공진컨버터의 특성을 얻도록 하였다. 추가된 병렬 인덕터(L_2) 값 변화에 따라 높은 전압 이득 특성을 갖게 되어 변압기의 적은 턴 수비에도 높은 출력전압을 얻을 수 있고 넓은 입력전압 범위와 모든 부하 범위에서 사용 가능한 장점을 가지게 되었다.

이와 같은 권선 방법에 의해 얻어진 변압기 2차측 등가 누설 인덕턴스(L_{l1}, L_{l2})와 직렬 커패시터(C_s) 그리고 외부에 추가한 병렬 인덕터(L_2)에 의해 변압기 2차측에서 LLC 직렬 공진특성을 얻었다. 본 논문에서 제안한 변압기 2차측 LLC 직렬 공진컨버터의 특성은 기존 LLC 직렬 공진컨버터의 특성과 유사하다.



(a) LLC 직렬공진 컨버터 적용 승압기 주회로



(b) 변압기 2차측 LLC 직렬공진컨버터 적용 승압기 주회로

그림 1 제안된 변압기 2차측 LLC 직렬공진컨버터 적용 승압기 주회로

또한 본 논문에서 실험 적용한 회로는 그림 2(a)에서 보는 바와 같이 변압기의 손실저감과 고집적화를 위해 변압기 2개를 이용하여 변압기 1차측은 병렬로 연결하여 변압기의 크기 및 각 변압기의 1차측 전류를 1/2로 줄였고, 변압기의 2차측은 직렬로 연결하여 적은 턴 수비에서도 요구되는 출력전압을 얻을 수 있게 하였다. 또한 넓은 입력전압범위에 의한 많은 순환 전류 및 변압기 1차측 대전류로 인한 도통 손실을 줄이기 위해 주스위칭 소자를 2개씩 병렬로 연결하여 도통손실을 줄일 수 있었다.

그림 2(a)는 제안된 변압기 2차측 LLC 직렬공진컨버터에 대한 주 회로이고, 그림 2(b)는 등가회로를 나타낸 것이다. 그림 2(b)의 $V_{T2}(V_e \cdot \frac{2}{N})$ 는 주스위칭 소자 (Q_1, Q_2, Q_3, Q_4)의 스위칭 동작에 의해서 얻어진 1차측 구형파 단자전압을 권선비를 고려하여 2차측으로 반영한 등가전원이며, C_s 과 $\frac{1}{N^2} \cdot (L1_n + L2_n)$, $L1_e, L2_e$ 는 2차측의 공진을 위한 직렬 커패시터와 턴 수비를 고려하여 2차측으로 반영한 1차측 누설인덕턴스 합과 2차측 누설인덕턴스이다. 그리고 L_2 는 변압기 2차측에 추가한 병렬 인덕터이고, R_{eq} 는 부하저항, 정류다이오드 및 커패시터 필터를 등가화한 등가부하저항이다. 식 (2-1)의 L_T 는 변압기 등가모델을 이용하여 변압기 2차측에서 권선 비($N = n_1/n_2$)를 고려하여 바라본 1차측 누설인덕턴스와 2차측 누설인덕턴스 및 2차측 자화인덕턴스의 관계로 등가 누설인덕턴스를 얻을 수 있다. 하지만 이러한 등가누설인덕턴스는 2차측 자화인덕턴스가 권선비를 고려한 1차측 누설인덕턴스보다 크므로($(1/N^2)L1_n \leq N^2L1_m$, $(1/N^2)L2_n \leq N^2L2_m$) 해석의 용이성을 위해 식 (2-2)과 같이 간략화 된 등가누설인덕턴스로 나타내었다.

$$R_{eq} = \frac{8}{\pi^2} R_L \quad (1)$$

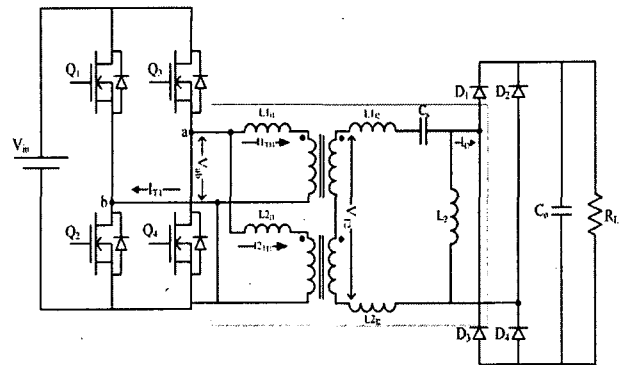
$$L_T = \frac{\frac{1}{N^2} L1_n \cdot N^2 L1_m + \frac{1}{N^2} L2_n \cdot N^2 L2_m}{\frac{1}{N^2} L1_n + N^2 L1_m + \frac{1}{N^2} L2_n + N^2 L2_m} + L1_e + L2_e \quad (2-1)$$

$$\cong \frac{1}{N^2} \cdot (L1_n + L2_n) + L1_e + L2_e \quad (2-2)$$

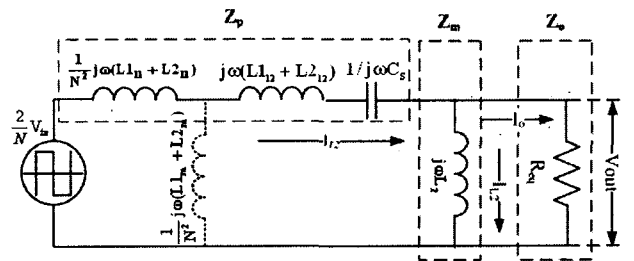
그리고 본 논문에서는 그림 2(a)를 등가화한 그림 2(b)로부터 등가 부하저항이 단락일 때의 주파수 즉 공진주파수(f_r)와 개방일 때의 주파수 즉 코너 주파수(Conner frequency : f_o)를 식(3)과 식(4)에 정의하였다.

$$f_r = 1/2\pi \sqrt{L_T \cdot C_s} \quad (3)$$

$$f_o = 1/2\pi \sqrt{(L_T + L_2) \cdot C_s} \quad (4)$$



(a) 주회로



(b) 등가회로

그림 2 제안된 변압기 2차측 LLC 직렬공진컨버터 적용 승압형 DC/DC 컨버터 주회로와 등가회로

규준화된 공진 주파수(f_n)는 공진 주파수(f_r)와 스위칭 주파수(f_s)의 비이고, A는 병렬인덕턴스(L_2)와 등가누설인덕턴스(L_T)의 비이다. 그리고 Q는 Quality Factor이다.

$$f_n = \frac{f_s}{f_r} \quad (5)$$

$$A = \frac{L_T}{L_2} \quad (6)$$

$$Q = \frac{2\pi \cdot f_r \cdot L_T}{R_{eq}} \quad (7)$$

그리고 임피던스 관계 및 위의 수식(1)~(7)를 바탕으로 얻어진 입·출력에 대한 전압이득(M) 특성은 식(8)과 같이 얻었다.

$$|M| = \left| \frac{Z_o Z_m}{Z_o Z_p + Z_m Z_p + Z_o Z_m} \right| \quad (8)$$

$$= \left| \frac{1}{1 + A - \left(\frac{1}{f_n}\right)^2 \cdot A + jQ\left(f_n - \frac{1}{f_n}\right)} \right|$$

전압이득(M) 특성 식(8)으로부터 알 수 있듯이 전압이득은 등가누설인덕턴스인 직렬공진인덕턴스(L_T)와 2차측 병렬인덕턴스(L_2)의 비(A) 및 부하 Quality factor(Q)와 기준화된 공진주파수(f_n) 값에 의존한다. 이러한 경우 기준화된 공진주파수(f_n) 및 Q 변화에 대해 전압이득(M) 변화를 알아보기 위해 식(8)을 이용하여 시뮬레이션 한 결과를 그림 3에 나타내었다. 그림 3는 등가 누설인덕턴스(L_T)와 변압기 2차측 병렬인덕턴스(L_2) 비인 A가 0.3일 때 기준화된 주파수(f_n)와 Q 변화에 대한 전압이득 특성 곡선이다. 등가누설인덕턴스와 병렬인덕턴스 비(A)가 클수록 즉 병렬 인덕턴스가 작아질수록 전압이득이 높아지며 스위칭 동작을 하기 위한 기준화된 공진주파수의 스위칭 범위가 협소해진다. 이러한 협소한 스위칭 주파수 범위와 높은 전압이득 특성은 병렬인덕턴스 값이 감소하고, 병렬 인덕터에 흐르는 전류를 증가시킬 뿐만 아니라 도통 손실을 증가시키는 원인이 된다. 따라서 중 부하에서도 주어진 입력 전압변동 범위에 대한 1차측 스위칭소자가 영 전압 스위칭을 이룰 수 있는 병렬 인덕턴스(L_2) 값과 병렬 인덕터 전류를 구하기 위해 A와 Q 값을 적절하게 사용해야 한다. 또한 본 논문에서 제안된 변압기 2차측 LLC 직렬공진컨버터 적용 승압형 DC/DC 컨버터는 그림 4에서 볼 수 있듯이 ZVS 영역 중에서도 스위칭 동작 영역이 기준화된 주파수(f_n)가 1보다 낮은 주파수에서 사용하고 있으며, 이러한 경우 주스위칭 소자의 영전압 스위칭(ZVS) 뿐만 아니라 변압기 2차측 정류 다이오드의 영전류 스위칭(ZCS)을 얻을 수 있다.

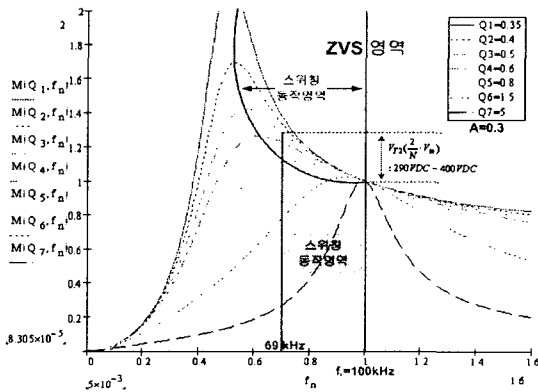


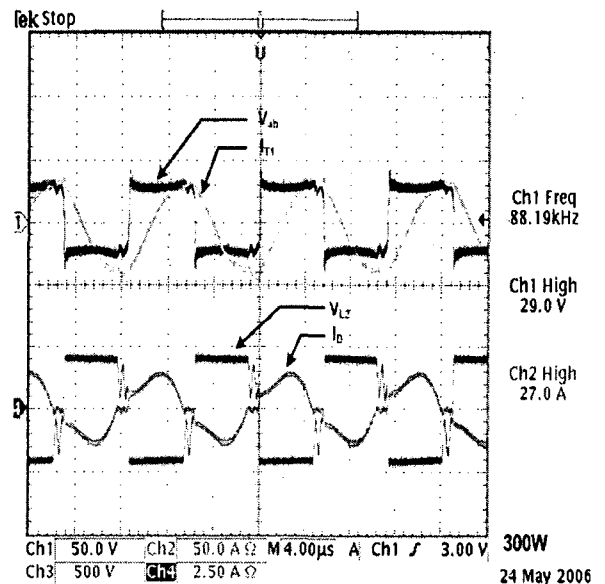
그림 3 변압기 2차측 LLC 직렬공진컨버터의 전압이득 특성곡선

3. 실험결과

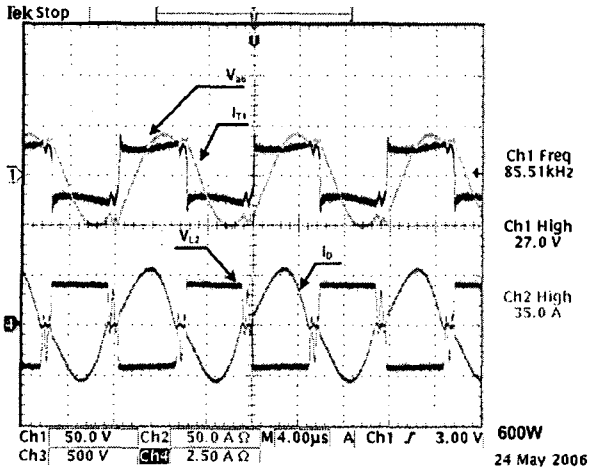
표 1 변압기 2차측 LLC 직렬 공진컨버터 적용 승압형 DC/DC 컨버터 주요정격

입력전압	22~30VDC
출력전압	400VDC
출력전류	2.5A
주스위칭 주파수	70kHz ~ 100kHz
직렬공진 주파수	100kHz
주스위칭소자 (병렬 2EA씩 연결)	IRF 3077PbF (75V, 210A, R _{DS} =3.3mΩ)
출력정류 다이오드 (D ₁ , D ₂ , D ₃ , D ₄)	DESI 12-06A (600V, 14A, V _F =1.5V)

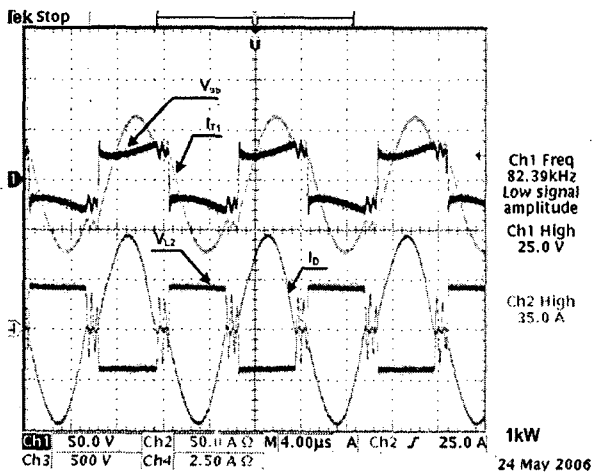
본 논문에서 제안한 변압기 2차측 LLC 직렬 공진컨버터 적용 승압형 DC/DC 컨버터는 낮은 입력전압(22~30VDC)에서 높은 출력전압(400VDC)으로 승압시킬 수 있도록 1kW급으로 설계하였다. 또한 변압기 2차측 LLC 직렬 공진컨버터 적용 승압형 DC/DC 컨버터에 대한 실험조건과 적용된 소자 등을 표 1에 나타내었다. 그림 4 (a), (b), (c)는 일정 출력전압에 대해 300W, 600W, 1kW에 대한 변압기 1차측 단자전압과 전류 및 2차측 부하전류와 병렬 인덕터 양단전압에 대한 실험파형이다. 그림 4(a)에서부터 그림 4(c)까지 볼 수 있듯이 중부하(1kW)에서 경부하(300W)까지 제안된 변압기 2차측 LLC 직렬공진컨버터 적용 승압형 DC/DC 컨버터는 모든 단자전류가 단자전압(V_{ab})에 대해 지상전류가 흐르는 것을 볼 수 있으며, 모든 부하 변화에 대해 주스위칭 소자의 영전압 스위칭을 확인하였다. 그리고 그림 4(a)에서 그림 4(c)까지 실험결과 파형의 주파수 변화(82.39kHz ~ 88.19kHz)는 그림 3의 시뮬레이션 스위칭 주파수 범위(100kHz ~ 70kHz)와 동일한 스위칭 주파수 범위 내에서 동작하는 것을 볼 수 있다. 또한 변압기 1차측 공진 전류가 불연속으로 흐르기 때문에 변압기 2차측 정류 다이오드의 역회복 손실을 줄일 수 있다. 또한 그림 5는 1kW급 제안된 변압기 2차측 LLC 직렬공진컨버터 적용 승압형 DC/DC 컨버터에 대한 시제품 사진이다.



(a) 300W



(b) 600W



(c) 1kW

그림 4 제안된 변압기 2차측 LLC 직렬공진컨버터 적용 승압형 DC/DC 컨버터의 1차측 전압(V_{ab})과 전류(I_{r1}) 및 2차측 부하전류(I_D)와 병렬인덕터 전압(V_{L2}) 실험파형 (50V/div., 50A/div., 500V/div., 2.5A/div., 4µs/div)

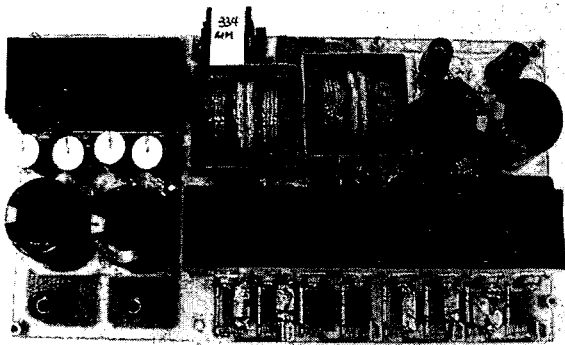


그림 5 변압기 2차측 LLC 직렬공진 컨버터 적용 승압형 DC/DC 컨버터 시제품 사진

4. 결 론

본 논문에서는 PCS 시스템 중 제안된 변압기 2차측 LLC 직렬 공진컨버터 적용 승압형 DC/DC 컨버터를 제안하였고, 전압

이득 특성에 대해 이론적인 해석하였으며, 이 해석을 기본으로 1kW급 시제품을 제작하여 실험한 결과에 대해 서술하였다. 실험 결과 제안된 변압기 2차측 LLC 직렬공진컨버터 적용 승압형 DC/DC 컨버터는 모든 부하 범위에 대해 주스위칭 소자가 소프트 스위칭을 이룰 수 있었고, 출력 부하변화에 대해 일정 출력 전압을 얻을 수 있었다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2006-B-117) 주관으로 수행된 과제임.

참 고 문 헌

- [1] Lai, J.S "A High-Performance V6 Converter for Fuel Cell Power Conditioning System" Vehicle Power and Propulsion, 2005 IEEE Conference, sept 2005, pp 624-630.
- [2] M. Schenck, K. Stanton, and J.S Lai, "Fuel Cell and Power Conditioning System Interactions", Proc. of IEEE Applied Power Electronics Conference, Austin, TX, March 2005, pp.114-120.
- [3] C.Liu, A.johnson and J.-S. Lai, "A Novel Three-Phase High Power Soft Switched DC/DC Converter for Low Voltage Fuel Cell Applications," Proc. of IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Anaheim, CA, Feb 2004, pp.1365-1371.
- [4] Bo Yang, F.C Lee, A.J. Zhang, "LLC Resonant Converter for Front End DC/DC Conversion", IEEE - APEC 2002, Vol. 2, pp.1108-1112, 2002.
- [5] M.K Kazimierczuk, T. Nandakumar, "Class D voltage-switching inverter with tapped resonant inductor", IEEE Proceeding on Electric Power Applications, Vol. 140, pp.172-182, 1988.