

전하펌프 역률개선 회로를 적용한 양방향성 AC-DC Converter 설계

고석철\*, 임성훈, 한병성  
 전북대학교 전자정보공학부

Design of a Bidirectional AC-DC Converter using Charge Pump Power Factor Correction Circuit

Seok-Cheol Ko\*, Sung-Hun Lim, Byoung-Sung Han  
 Division of Electronics & Information Engineering Chonbuk University

**Abstract** - This paper deals with a bidirectional ac-dc converter used in ups system application. We propose a Voltage-Source-Charge-Pump-Power-Factor-Correction(VS-CPPFC) ac-dc converters. First of all, we propose a charge pump power-factor-correction converter. Secondly, we derive and analyse a unity power factor condition. The proposed topology is based on a half-bridge for the primary and a current-fed push pull for the secondary side of a high frequency isolation transformer. The advantage of bidirectional flow of power achieved by using the same power components is that the circuit is simple and efficient. And the galvanically isolated topology is specially attractive in battery charge/discharge circuits in ups system. We design equivalent model for the steady-state circuit and analyse operation waveforms for each mode. We show that the proposed model can be applied to ups system by simulation processes.

절연, battery 충전전류의 낮은 리플과형, 전원장에서 빠른 스위치 전환, 능동 스위치의 적은 소요부품, 특히 충·방전시 양방향에서 동일한 소자를 사용하기 때문에 부품 수량을 줄일 수 있다. CPPFC(Charge-Pump Power-Factor-Correction)동작원리와 battery의 충·방전 과정에 대한 등가모델을 세우고 각 모드별로 동작 과정을 해석, backup 모드시 배터리의 직류전압이 제한한 회로를 통해 교류 부하에 적용할 수 있다는 것을 Simulation을 통해 확인할 수 있었다.

1. 서 론

과거에는 출력전압의 질적인 면보다는 정전시 비상 발 전기가 부하에 투입되기 전까지 부하에 정격 실효치 전압을 공급하여 정전을 막아주는 양적인 역할에만 관심이 집중되어 왔다. 최근에는 양질의 출력전압을 얻기 위한 연구가 진행되고 있다. 대표적인 시스템인 on-line 무정전 전원장치는 위상제어 정류형 충전기를 이용한다. 입력전류는 높은 최대값과 실효율을 가지고 있어서 대용량의 퓨즈와 차단기를 필요로 한다. 왜곡된 입력전류는 전자기적 문제를 야기하기 때문에 전력계통에 영향을 미친다. 그래서 고조파 제거를 위해 입력측에 L-C 저역 필터를 설치한다. 높은 고조파가 포함된 입력전류는 메인 전압을 왜곡시키며, 높은 입력전류 실효율은 정류형 충전기의 효율을 저하시킨다. 따라서, 입력전류에 포함된 고조파 문제를 해결하기 위해 양방향성 회로가 연구되고 있다. 보통 3포트 누설 변압기와, 멀티 기능형 컨버터, 충전지로 구성된 양방향성 회로와 2포트 절연 변압기, 2개의 스위치를 이용한 buck-boost 컨버터, 배터리를 충전하기 위한 풀브리지 정류회로로 구성된 2SBBDB(2-Switch Buck Boost Dual Active Bridge)가 있다. 종래의 ups회로는 구성요소의 증가, 회로의 복잡성, 공진 모드 과정에서 도전손실, 높은 출력전류의 리플 과형, 소프트 스위칭 회로에서 경미한 부하에 대한 소프트 스위칭 손실, 전기절연 결핍 등 문제점이 많다. 따라서, 본 연구에서는 charge pump power factor correction을 적용한 ups system의 양방향성 ac-dc converter에 관한 연구이다. 절연 변압기 1차 측에는 저가격의 수동소자를 이용한 고역률 전하펌프 역률 개선 인버터 방식을 사용했으며, 2차 측에는 buck converter를 사용하여 battery의 충·방전에 적용할 수 있는 매우 간단한 구조의 회로이다. 제안한 회로를 사용함으로써 소자의 스트레스를 줄이고, 부하에 C·F(Crest Factor)를 낮게 하였으며, 전기

2. 제안한 양방향성 AC-DC 컨버터

2.1 제안한 회로의 특징

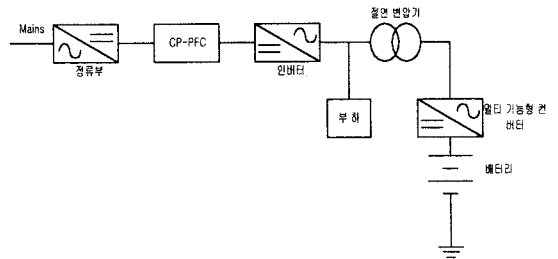


그림1. 제안한 양방향성 AC-DC 컨버터의 블록선도

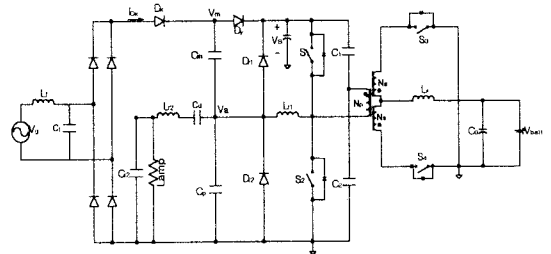


그림2. 제안한 양방향성 AC-DC 컨버터 회로도

그림1은 제안한 양방향성 ac-dc 컨버터 회로의 블록 선도이고, 그림2는 제안한 양방향성 회로도이다. 고주파 변압기는 교류 전압원인 배터리에 전기적 절연 역할을 한다. 컨버터의 1차 측은 전하 펌프 역률 개선 인버터로 구성되어 있으며, 교류 전압을 전파 정류한 직류 라인 버스에 연결되어 있다. 2차 측은 current-fed push-pull 형태로 배터리에 연결되어 있다. 이 컨버터는 2가지 동작 모드를 갖는다. Forward/Charging 모드에서 교류 전압으로부터 에너지를 부하에 공급하는 동시에 배터리를 충전시킨다. 이 동작 모드에서 스위치 S<sub>1</sub>과 S<sub>2</sub>가 턴 온 되고, 스위치 S<sub>3</sub>, S<sub>4</sub>의 바디 다이오드는 전파 정류가 되게 하여 배터리를 충전시킨다. 주전원 장에서 전력 흐름이 바뀌게 되고 배터리로 부터 전력을 부하에 공급하게 된다. backup/current-fed 모드에서 S<sub>3</sub>, S<sub>4</sub>는 턴 온

되고,  $S_1$ 과  $S_2$ 의 바디 다이오드는 직류 bus 라인에 정류되어 전하 펌프에 공급되고 전하 펌프 인버터는 교류 부하를 동작시킨다.

## 2.2 제한한 회로의 동작 해석

### 2.2.1 Forward-Charging Mode

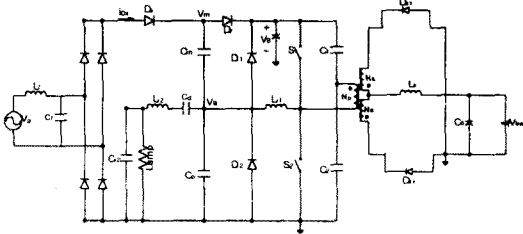


그림3. Forward-Charging Mode

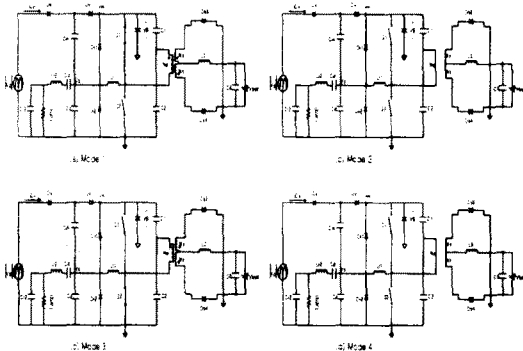


그림4. Forward-Charging 모드의 동작 과정

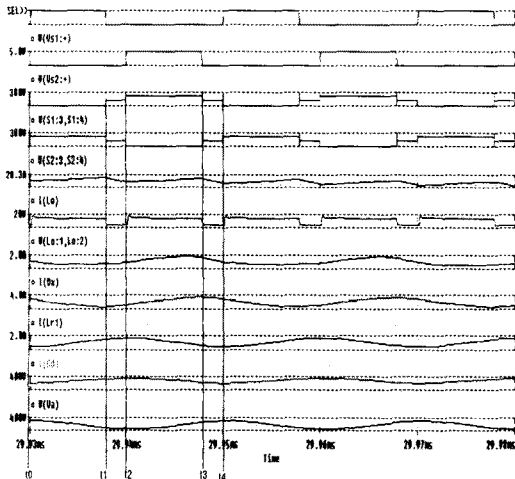


그림5. Forward-Charging 모드 동작 파형

그림3은 교류 입력전원  $V_g$ 는 전하 펌프 역를 개선 (CP-PFC) 컨버터를 거쳐 배터리 충전전류  $i_{L0}$ 에 전력을 전달한다. 절연 변압기 1차 측에 있는 스위치  $S_1$ 과  $S_2$ 는 통류율을 0.5 이하로 턴 온 되게 한다.  $S_3$ 와  $S_4$ 는 전역 스위치가 동작하지 않도록 한다. 이 모드에서 양방향성 CP-PFC 컨버터를 buck 컨버터로 생각 할 수 있다. 그림4는 스위칭 주기동안 각 부분별 동작 과정을 보여주고 있다. 그림5는 충전 모드와 부하의 동작 과정을 나타내고 있다. 스위치  $S_1$ 과  $S_2$ 의 최대·최소 통류율 값

과, 램프를 계속 동작시킬 수 있는 최소 부하 조건하에 지속적인 인덕터 전류를 유지하기 위한 출력 인덕터 최소값  $L_{0,min}$ 은 아래와 같이 규정할 수 있다.

$$D_{s1,s2,min} = \frac{V_{Batt,max}}{V_g,max}, D_{s1,s2,max} = \frac{V_{Batt,max}}{V_g,min} \quad (1)$$

$$L_{0,min} = \frac{V_{Batt,max}}{4 \cdot f_s \cdot I_{Batt,min}} (1 - 2 D_{s1,s2,min}) \quad (2)$$

$L_0$ 의 실제적인 값은  $L_{0,min}$  이하여야 한다.

$$C_0 = \frac{L_0 \cdot I_{Batt,max}^2}{V_{Batt,peak}^2 - V_{Batt}^2} \quad (3)$$

$V_{Batt,peak}$  값은 부하가 제거되었을 때 배터리 전압의 최대값이다.

#### 모드 1 [ $t_0-t_1$ ]

스위치  $S_2$ 는 턴 오프 되고  $S_1$ 은 턴 온 된다. 절연 변압기 1차측 권선에  $V_g/2$  입력 전압이 나타난다. 바디 다이오드  $D_{S4}$ 는 순방향이 되어 절연 변압기 2차 측에 정류 파형을 제공하고, 배터리에 충전 전류  $i_{Batt}$ 를 보내는 역할을 한다.  $S_1$ 이 턴 온 되면 스위치  $S_1$ 에 전류  $i_{S1}$ 가 흐르게 되고, 변압기 1차측 자화 전류를 발생시킨다. 또한 유기 기전력에 의한 2차측 전류에 비하여 인덕터 전류  $i_{L0}$ 는 선형적으로 증가한다. 부하에서 동작 과정은 클램프 다이오드  $D_{r2}$ 는 오프 되고, 인덕터 전류  $i_{Lr1}$ 은 선형적으로 감소한다. 커패시터  $C_{in}$ 의 충전 전압은 변하지 않는다. 클램프 다이오드  $D_{r2}$ 가 오프 되기 때문에 커패시터  $C_p$ 는  $L_{r1}$ 과 공진을 형성한다.  $v_a$ 는  $V_B - |V_g|$ 의 값으로 증가하고,  $D_y$ 는 도통되기 시작한다.  $v_a$ 의 전압 증가 때문에 커패시터  $C_{in}$ 에 저장된 에너지는  $D_y$ 를 통하여 벌크 커패시터  $C_B$ 에 전달된다.

#### 모드 2 [ $t_1-t_2$ ]

$t_1$ 에서 스위치  $S_1$ 은 턴 오프 되고,  $S_2$ 는 계속 턴 오프를 유지한다. 이 데드타임 구간 동안 1차측에는 영전압이 되므로, 2차 측으로 전력이 전달되지 않는다.  $L_0$ 에 저장된 에너지는 인덕터 전류  $i_{L0}$ 가 환류되고, 바디 다이오드  $D_{S3}$ ,  $D_{S4}$ 를 통하여 배터리를 동시에 똑같이 충전시킨다. 이 구간에서만 공급되는 전압의 절반만이 각각의 스위치  $S_1$ 과  $S_2$ 를 통하여 나타난다.  $v_a$ 는 벌크 커패시터 전압  $V_B$ 까지 증가한다.  $C_{in}$ 에 저장된 모든 에너지는  $C_B$ 에 전달되고, 클램프 다이오드  $D_{r1}$ 은  $i_{cd}$ 와  $i_{Lr1}$ 사이의 차 전류를 흐르게 한다. 인덕터 전류  $i_{Lr1}$ 이 부하전류  $i_{cd}$ 보다 큰 전류를 가지고 있다면 클램프 다이오드  $D_{r1}$ 은 턴 온 상태를 계속 유지하고, 인덕터 전류  $i_{Lr1}$ 은 부하전류  $i_{cd}$ 와 같아질 때까지 음의 값에서 양의 값으로 선형적으로 증가한다. 이때, 클램프 다이오드  $D_{r1}$ 은 턴 오프 된다.

#### 모드 3 [ $t_2-t_3$ ]

$t_2$ 에서 스위치  $S_2$ 는 턴 온 되고,  $S_1$ 은 계속 턴 오프 상태를 유지한다. 스위치  $S_3$ 의 바디 다이오드  $D_{S3}$ 가 도통되고 2차측에 정류 파형을 제공한다. 인덕터 전류  $i_{L0}$ 는 인덕터 전압  $v_{L0}$ 가 증가함으로써 선형적으로 증가한다. 바디 다이오드  $D_{S3}$ 는 배터리에 충전 전류를 보낸다.  $D_x$ 와  $D_y$ 는 오프 되어 있고, 커패시터  $C_{in}$ 은 충·방전을 하지 않고 일정한 전압을 유지하다가  $v_a$ 의 전압이 입력 전압  $|V_g|$ 로 감소할 때  $D_x$ 는 도통되기 시작한다.  $v_a$ 는 입력 전압  $|V_g|$ 로 감소하며, 전하 커패시터  $C_{in}$ 은  $D_x$ 가

도통됨으로써 충전하기 시작한다.  $L_{r1}$ 과  $C_{in}$  사이에 공진 때문에  $v_a$ 의 전압은 공진 형태로 감소한다. 입력 전압  $|V_{gr}|$ 는 전하 커패시터  $C_{in}$ 을 충전한다. 그러므로, 전하 펌프  $L_{r1}$ 과  $C_{in}$ 는 입력 전원으로 부터 에너지를 흡수한다.

**모드 4 [ $t_3-t_4$ ]**

절연 변압기 1차측 스위치  $S_1$ 과  $S_2$ 는 턴 온 되지 않고, 단지 인덕터에 저장된 에너지에 의해 배터리에 충전 전류를 제공한다. 절연 변압기 2차측 바디 다이오드  $D_{S3}$ 와  $D_{S4}$ 는 동시에 똑같이 도통되어 배터리를 충전하게 된다.  $S_2$ 는 턴오프 되고,  $v_a$ 는 영전압까지 감소한다.  $C_{in}$ 는 입력 전압으로부터 충전되고, 클램프 다이오드  $D_{r2}$ 는 도통되기 시작한다. 인덕터  $L_{r1}$ 이  $D_{r2}$ 와  $C_2$ 를 통하여 단락 되기 때문에 인덕터 전류  $i_{Lr1}$ 은 일정하다.  $i_{cd}$ 와  $i_{Lr1}$  사이에 차 전류가 클램프 다이오드를 통해 흐른다. 인덕터 전류는 부하전류  $i_{cd}$ 와  $i_{Lr1}$ 이 같아질 때까지 선형적으로 감소한다. 이때, 클램프 다이오드  $D_{r1}$ 은 턴 오프 된다.

**2.2.2 Backup/Current-Fed Mode**

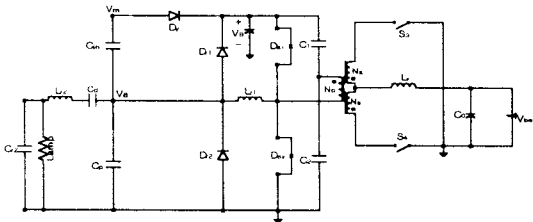


그림6. Backup/Current-Fed Mode

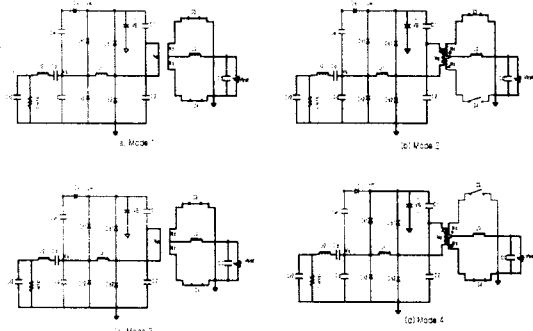


그림7. Backup/Current-Fed 모드의 동작 과정

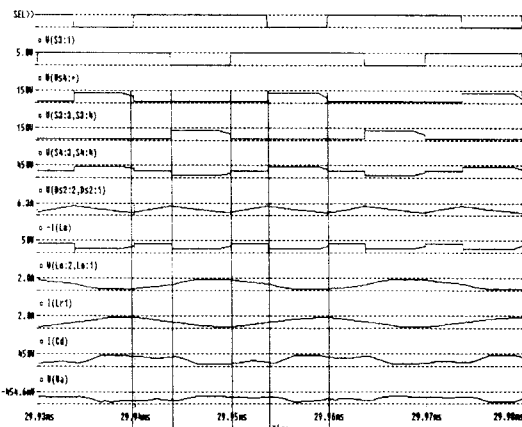


그림8. Backup/Current-Fed 모드의 동작 파형

그림6은 주전원 고장시 배터리로부터 부하 전력을 공급하기 위한 backup 모드 회로이다. 스위치  $S_3$ 와  $S_4$ 의 통류율을 0.5 이상으로 해야한다. 또한, 스위치  $S_1$ 과  $S_2$ 가 전혀 동작하지 않도록 한다. 그림7은 스위칭 주기 동안 각 부분별 동작 파형을 보여주고 있다. 그림8은 backup/current-fed 모드와 교류부하의 동작 과정을 보여주고 있다. 스위치  $S_3$ 와  $S_4$ 의 통류율은 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$D_{S3,S4, \min} = \frac{1 - 2 V_{g, \min}}{V_g}$$

$$D_{S3,S4, \max} = \frac{V_g - V_{Batt, \min}}{V_g} \quad (4)$$

**모드 1 [ $t_0-t_1$ ]**

$t_0$ 에서 스위치  $S_3$ 은 턴 온 되고,  $S_4$ 는 턴 온 상태를 계속 유지하고 있다. 변압기 2차측은 단락 상태가 된다. 왜냐하면 전체 배터리 전압이 인덕터  $L_0$ 에 에너지를 저장하기 때문이다. 인덕터 전류  $i_{L0}$ 은 스위치  $S_3$ 와  $S_4$  양쪽으로 똑같이 나누어지므로 선형적으로 증가한다.

**모드 2 [ $t_1-t_2$ ]**

$t_1$ 에서 스위치  $S_4$ 는 턴 오프 되고,  $S_3$ 는 계속 턴 온 상태를 계속 유지한다. 인덕터  $L_0$ 에 저장된 에너지는 스위치  $S_3$ 을 통해 변압기 1차측 컨버터에 전달된다.

**모드 3 [ $t_2-t_3$ ]**

$t_2$ 에서 스위치  $S_4$ 는 턴 온 되고,  $S_3$ 는 턴 온 상태를 계속 유지한다. 스위치  $S_3$ 의 통류율이 0.5 이상 되어야만 스위치  $S_3$ 와  $S_4$ 가 동시에 턴 온 될 수 있다. 따라서 변압기 2차측은 사실상 단락상태가 되고, 인덕터  $L_0$ 은 에너지를 저장한다. 결과적으로, 인덕터 전류  $i_{L0}$ 은 선형적으로 증가한다.

**모드 4 [ $t_3-t_4$ ]**

스위치  $S_4$ 는 턴 온 상태를 유지하고,  $t_3$ 에서 스위치  $S_3$ 는 턴 오프 된다. 인덕터  $L_0$ 에 저장된 에너지는 스위치  $S_4$ 를 통해 변압기 1차측 컨버터에 전달된다.

**2.3. 시뮬레이션 및 결과 고찰**

이상으로 제안한 회로의 동작과정을 해석했으며, 동작 파형을 시뮬레이션으로 알아보았다. 부하는 교류에 사용할 수 있는 40W용 형광램프 2개를 전자식 안정기에 병렬로 연결하여 사용하였다. 설계 사양과 설계 값은 표1에 나타내었다. 또한, 그림9는 충전모드와 백업모드 과정에서 부하 파형을 보여주고 있다. 충전모드시 램프 파형은 crest factor가 약간 높은 것을 볼 수 있으나 백업모드시 램프 파형은 crest factor가 아주 낮은 것을 확인할 수 있다. 이것은 램프 전류의 리플 파형이 적다는 것을 의미한다.

표 1 설계사양 및 설계 값

Parameters	설계 값	Parameters	설계 값
입력 전압	220V(rms)	$L_{r2}$	814 uF
출력 전압	237V(rms)	$C_{i2}$	10.17 nF
출력 전류	0.35A	$C_1$	150 uF
스위칭 주파수	50 kHz	$C_2$	150 uF
커패시터 $C_{in}$	40 nF	$L_0$	334 uH
$C_p$	2.8 nF	$L_0$	2 mH
$L_{r1}$	334 uF	$L_s$	334 uH

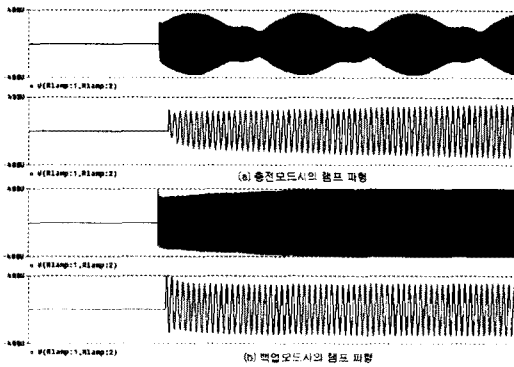


그림9. Charging/Backup 모드시 램프 파형

### 3. 결 론

본 논문에서는 ac부하에 적용할 수 있는 CPPFC 양방향성 컨버터를 제안하였다. 정상시 전력이 배터리와 ac 부하에 원만하게 공급하고 있으며, main 전원 장애 시 충전된 배터리로부터 ac 부하에 전력이 잘 공급됨을 확인할 수 있었다. 충전 모드와 백업 모드 과정을 해석하고, pspice를 사용한 시뮬레이션으로 전력 흐름 과정을 분석함으로써 ups 실현가능성을 입증하였다. 차후 연구 방향은 변압기의 서지 전압을 제거할 수 있는 방안과 통류율을 변화시켰을 때의 충전모드와 백업모드의 충전전류, 인덕턴스 등의 변화와 스위칭 주파수를 변화시켰을 때의 이득 값의 변화, 형광 램프 외에 ac부하에 적용할 수 있는 회로에 대해 연구를 수행하고자 한다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] Jain, M.; Jain, P.K.; Daniele, M. "A bi-directional DC-DC converter topology for low power application" IEEE-PESC '97. vol.1, pp.804 -810, 1997
- [2] Jinrong Qian; Lee, F.C. "Voltage-Source Charge-Pump Power-Factor-Correction AC/DC Converters" Power Electronics IEEE, Vol 14, pp.350-358, 1999.
- [3] Jinrong Qian; Lee, F.C.; Yamauchi, T. "Analysis, design, and experiments of a high-power-factor electronic ballast Industry Applications, IEEE, Vol 34, pp. 616 -624, 1998
- [4] Richard Morrison; Michael G. Egan, "A New Power-Factor-Corrected Single-Transformer UPS Design" IEEE transactions, Vol 9, pp.171-179, 2000
- [5] 강범석; 김희준; "자외선 살균 램프용 교류를 전자식 안정기에 관한 연구" 대한전기학회 하계학술대회 논문지 Vol 4, pp.1202-1205, 2000
- [6] 김재식; "UPS 인버터의 출력필터와 제어기 설계" 충북대학교 전기공학과 박사학위 논문, vol 136, pp.1-136, 2001. 2