

High Frequency Link 전력계통 연계형 PCS

김은수, 윤광호, 강성인, 차인수*
전주대학교, 동신대학교*

High Frequency Link PCS for Interfacing with Power Utility System

E.S Kim, G.H Yoon, S.I Kang, I.S Cha*
Jeon-Ju University, Dong-Shin University*

1. 서론

최근 PCS(Power Conditioning System)는 고집적화 및 고기능화를 통해 소형화 및 단가를 저감하는 추세에 있다. 따라서 PCS 시스템에 적용되는 전원장치에 있어서 크기 및 무게저감 그리고 높은 전력밀도와 효율 특성을 요구하고 있고, 이러한 요구조건을 만족하기 위해 고주파 스위칭방식의 ZVS DC/DC 컨버터가 적용된 PCS시스템들이 연구되어왔고 [1], 전력밀도 및 효율특성을 증가시키기 위해 공진컨버터가 검토되고 있는 추세이다 [2, 3].

하지만, 공진컨버터를 적용한 High Frequency Link 계통연계 PCS (Power Conditioning System)는 절연을 위한 변압기를 소형경량화 할 수 있지만 계통연계 (110V_{AC}/60Hz)를 위한 PWM 인버터 부분의 하드스위칭에 의한 전력변환 손실 증가 및 PWM 인버터 입력커패시터 (C_0)와 60Hz의 저주파 인덕터(L_f)를 사용함으로써 부피 및 크기를 저감시키는데 한계성을 가지고 있다.

본 논문에서는 공진컨버터와 계통연계 인버터로 구성된 PCS시스템 보다는 구성부품의 최소화 및 단가저감을 위해 그림1에 나타낸바와 같이 LLC 공진인버터와 계통연계 (110V_{AC}/60Hz)를 위한 LF Cyclo-converter로만 구성된 고효율의 High Frequency Link PCS (Power Conditioning System)에 대한 회로를 제안하였다.

제안된 회로에서는 인덕터와 변압기를 하나의 변압기로 일체화시켜 LLC 공진인버터가 동작되도록 하였고 특히 변압기 2차측 누설인덕턴스를 증가시키는 방향으로 변압기를 권선하여 출력 측 필터인덕터 처럼 동작되도록 설계함으로써 저가격, 고집적화 PCS를 구현하도록 하였다.

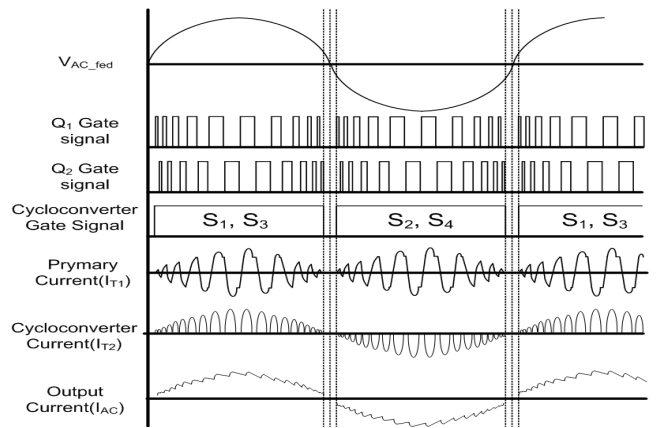
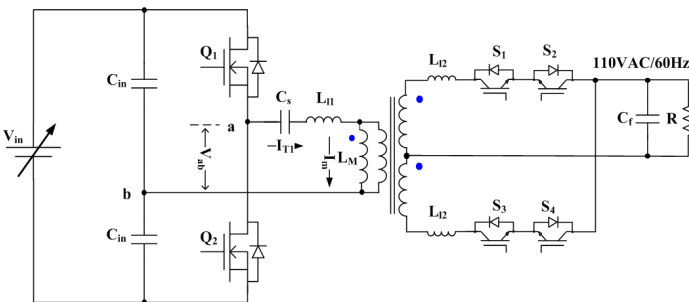
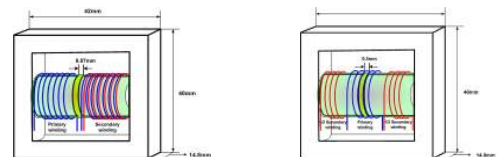


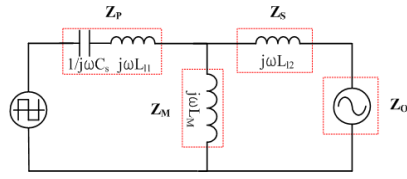
그림 1. High Frequency Link 고집적 LLC 공진인버터와 LF (Low Frequency) Cycloconverter를 적용한 제안된 전력계통 연계형 PCS 주회로와 동작파형

2. LLC 공진인버터와 LF Cycloconverter 적용 PCS

본 논문에서는 공진에 필요한 1, 2차 측 누설인덕턴스를 증가시키는 방법으로 그림 2(a)에 나타낸바와 같이 1,2차측 권선분리형 LLT변압기나 2차측 권선을 양끝으로 분리한 사이에 1차측 권선을 위치하고 변압기 중간에 공극을 삽입한 LLT 변압기를 적용 할 수 있다. 이러한 권선방법에 의한 증가된 변압기 2차측 누설인덕턴스는 전압이득 특성곡선에 있어 기존 LLC 직렬 공진인버터에 적용한 변압기를 사용한 경우보다 2차측 누설인덕턴스의 증가로 인해 전체적으로 높은 전압이득 특성을 가지게 된다. 뿐만 아니라 계통연계형 PCS에 적용의 경우 출력 필터인덕터로서의 역할을 함으로써 부품저감에 따른 회로의 단순화 및 고집적화 PCS를 구현 할 수 있다. 이에 대한 이득특성을 고려하기 위해 등가회로를 그림 2(b)에 나타냈다. 임피던스 관계 및 위의 수식(1)~(6)를 바탕으로 얻어진 입출력에 대한 전압이득 특성은 식(7)과 같다.



(a) LLT 변압기 권선



(b) 등가회로

그림 2. LLT 변압기 권선법 및 LLC공진인버터 등가회로

$$Z_{in} = Z_p + Z_M // (Z_s + Z_o) : \text{Input Impedance} \quad (1)$$

$$Z_o = R : \text{Output Impedance} \quad (2)$$

$$A = \frac{L_{n1}}{L_M} \quad (3), \quad B = \frac{L_{r2}}{L_M} \quad (4)$$

$$f_n = \frac{f_s}{f_r} : \frac{\text{Switching Frequency}}{\text{Resonant Frequency}} \quad (5)$$

$$Q = \frac{2\pi f_r L_{eq}}{R} : \text{Load Quality Factor} \quad (6)$$

$$V_G = \frac{Z_o I_2}{Z_{in} I_1}$$

$$= \frac{1}{N} \left| \frac{1}{1 + A - \left(\frac{1}{f_n}\right)^2 \cdot \left(A + \frac{B}{B+1}\right) + jQ \left(\frac{1}{N^2} + \frac{B}{N^2}\right) \left(f_n - \frac{1}{f_n}\right)} \right| \quad (7)$$

전압이득(M) 특성 식(7)으로부터 알 수 있듯이 전압이득은 1, 2차 측 누설인덕턴스(L_{n1} , L_{r2})와 자화인덕턴스(L_M)와의 비(A, B) 및 부하 Quality factor(Q)와 규준화된 공진주파수(f_n) 값에 의존한다. 또한 본 논문에서 제안된 LLC 공진인버터와 LF Cycloconverter로 구성된 PCS에서 승압모드와 강압모드 둘 다 동작될 수 있고, 상대적으로 좁은 주파수 제어범위에서 넓은 범위의 임·출력 전압제어를 할 수 있으며, 스위칭 동작영역에서 모든 스위칭소자들이 소프트 스위칭 할 수 있는 등의 여러 장점들을 갖고 있는 LLC 공진인버터의 이득특성 중 가변제어 스위칭주파수에 따라 그림 3에 나타난 것처럼 3가지 동작영역으로 나누어 설명할 수 있다.

첫 번째 동작영역은 ZVS 영역 중에서도 스위칭 동작영역이 규준화된 주파수(f_n)가 1보다 낮은 주파수 동작 영역인 불연속모드(Discontinuous Mode)에서 스위칭 하는 경우이다. 불연속 모드 동작 구간동안 흐르는 자화전류에 의해 주스위칭 소자는 영전압 스위칭(ZVS)을 하게 되고, 변압기 2차측 LF Cycloconverter의 스위칭소자에서는 불연속 동작특성에 따라 영전류 스위칭(ZCS)하게 된다. 두 번째 동작영역은 규준화된 주파수(f_n)가 1보다 높은 주파수영역인 연속모드(Continuous Mode)에서 스위칭 하는 경우이다. 이때에는 단자전압(V_{ab}) 보다 변압기 1차측에 흐르는 전류(I_{T1})가 지연되어 순환전류인 지상전류(Lagging Current)가 흐르므로 주스위칭 소자는 영전압 스위칭(ZVS)을 하게 되고, 변압기 2차측 LF Cycloconverter의 스위칭소자 또한 영전압 스위칭(ZVS) 동작을 하게 됨으로 불연속모드 뿐만 아니라 연속모드 동작영역 모든 구간에서도 소프트 스위칭 되는 특성을 얻을 수 있다. 세 번째 동작영역은 LLC 공진인버터의 전압이득을 더 낮은 전압으로 낮추기 위해 설정된 영역이다. LLC 직렬공진 인버터는 최대 스위칭주파수(F_{max}) 이상에서 스위칭 동작되도록 제어한다 할지라도 이득변화가 크지 않고, 기본적인 전압이득특성을 갖고 있기 때문에 이

때에는 설정된 최대 스위칭 동작주파수(F_{max}) 이상에서는 적용된 제어회로의 Controller에 따라 Burst Mode(L6599) 또는 Duty Control(MC34067)를 통해서 전압이득을 낮출 필요가 있다.

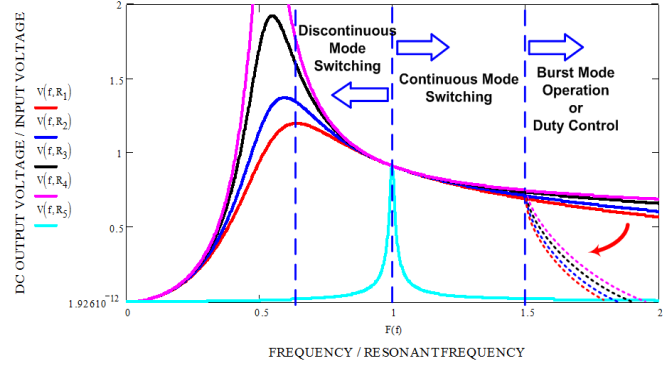


그림 3. LLC 공진 인버터 이득특성

3. 실험 결과

본 논문에서 제안한 LLC 공진인버터와 계통연계(110VAC/60Hz)를 위한 Cyclo-converter로 구성된 High Frequency Link PCS를 구현하기 위해 적용 실험하였다. 입력전압(350V_{DC} ~ 400V_{DC})에서 계통전압(110V_{AC}/60Hz)으로 연계하여 출력하였다. 제안된 PCS에 대한 실험조건과 적용된 소자 등을 표1에 나타냈다.

표 1 High Frequency Link PCS 주요정격 및 파라미터

입력전압	350V _{DC} ~ 400V _{DC}	출력전압	110V _{AC} /60Hz
직렬공진주파수 (f_r)	64kHz	스위칭 주파수(f_s)	63kHz ~ 240kHz
주스위칭소자 (Q_1, Q_2)	SD20N60(600V, 20A)		
LF Cycloconverter IGBT(S_1, S_2, S_3, S_4)	11N120CND (1200V, 43A)		
출력필터커패시터 (C_f)	3uF	직렬 공진커패시터(C_s)	44nF
고주파 변압기 ($N_1/N_2 : 36/27$)			
1차측 자기인덕턴스(L_p)	354.6uH	1차측 누설인덕턴스(L_{n1})	95.8uH
2차측 자기인덕턴스(L_s)	175.61uH	2차측 누설인덕턴스(L_{r2})	30uH
등가누설인덕턴스 (L_{eq})	138.9uH	자화인덕턴스(L_M)	258.8uH

직렬 커패시터(C_s)는 변압기 등가 누설 인덕턴스(L_{eq})와의 관계에 의해 공진 주파수(f_r)에 맞춰 계산된 값을 적용하였고, 1차측 누설인덕턴스(L_{n1})와 2차측 누설인덕턴스(L_{r2}) 및 자화 인덕턴스(L_M)는 정규화 된 수식에 의해서 추출하였다. 제작된 변압기에서 각각의 파라미터 L_{n1} , L_{r2} , L_M 을 근거로 Math-CAD를 이용하여 부하(R_L) 변화(20Ω(1.2kW) ~ 120Ω(200W))에 따른 전압이득 특성을 그림 4에 나타냈다.

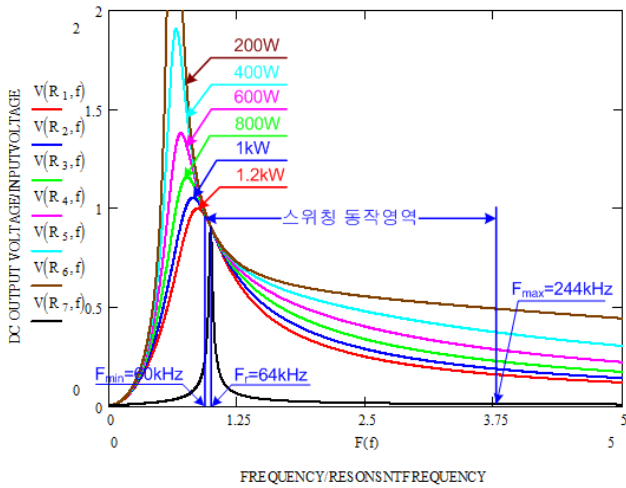
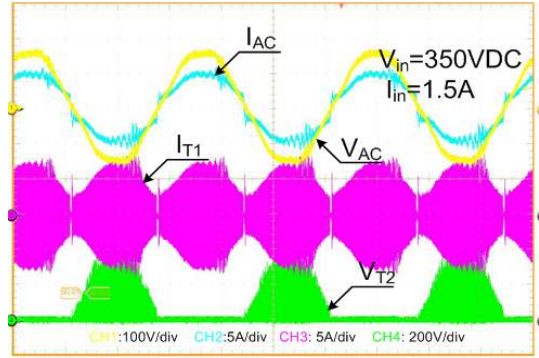
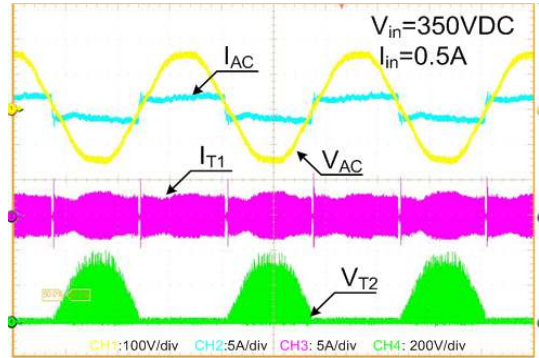


그림 4. 부하(R_L) 변화($20\Omega(1.2kW) \sim 120\Omega(200W)$)에 따른 전압이득 특성

동작 중 110VAC/60Hz 피크전압에서 최대 전류가 흐르기 때문에 주회로 설계에서 순간 최대전력에서 주 회로를 설계 검토 하여야한다. 따라서 최대전력을 전달하는 전압이득 특성으로부터 직렬공진주파수(f_r)가 64kHz이고 최대부하(1.2kW) 이득특성 기울기가 Negative에서 Positive로 꺾이는 주파수가 57kHz이기 때문에 모든 스위칭소자들의 소프트 스위칭을 위해 최소스위칭주파수(F_{min})를 60kHz로 제한하였고, 최대 주파수는 244kHz 로 두고 적용 실험했다. 그림 5와 그림 6, 그림 7과 그림 8은 입력전압(V_{in})을 각각 350V_{DC}, 400V_{DC}로 두고서 입력전류(I_{in})를 1.5A, 0.5A 일정 정 전류제어를 통해서 110VAC/60Hz 계통연계 된 PCS의 각 부 과형을 나타냈다. 계통전압(110VAC, 60Hz)에 따라 동상전류 제어됨을 볼 수 있다. 그림 5의 (b) 및 그림 7(b)의 경 부하에서는 스위칭주파수가 최대가 되고 이때 이득특성이 제한되어 있기 때문에 출력전류에 정현전류가 흐르지 않았지만, 경부하 때 Duty제어 및 Burst Mode 제어 등의 개선을 통해 향후 출력전류과형을 개선 할 필요성이 있다. 또한 그림 6과 그림 8의 실험과형을 통해 공진 인버터 1차측 주 스위칭소자(Q_1, Q_2) 뿐만 아니라 2차측의 LF Cycloconverter IGBT(S_1, S_2, S_3, S_4) 피크전압 없이 소프트 스위칭 됨을 확인 할 수 있다. 그림 9는 표 1 조건에서 측정된 효율특성으로 350VDC 입력전압(V_{in}), 입력전류(I_{in})를 1.5A에서 91.3%의 효율특성을 보여주었으며 400VDC 입력전압(V_{in}), 입력전류(I_{in}) 1.5A에서는 입력전압 증가에 따른 여자전류증가 및 1차 측 전류(I_{T1})의 증가에 의해 90%로 다소 효율특성이 저하되었지만 최적설계를 통해서 이를 개선 될 수 있다.

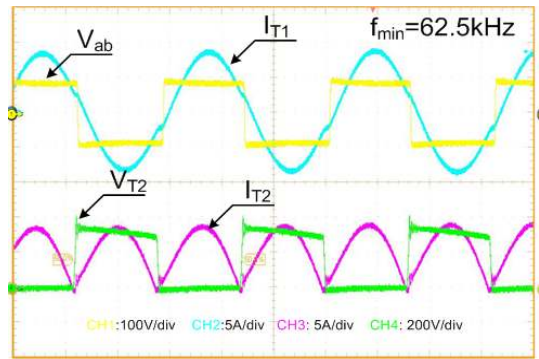


(a) 입력전압($V_{in} : 350VDC$), 입력전류 ($I_{in} : 1.5A$)

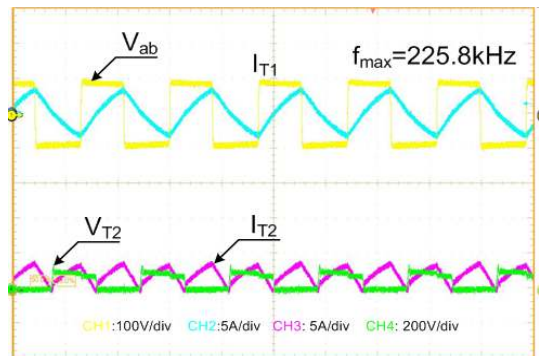


(b) 입력전압($V_{in} : 350VDC$), 입력전류 ($I_{in} : 0.5A$)

그림 5. 350VDC 입력전압(V_{in})에서 계통연계 PCS 실험과형

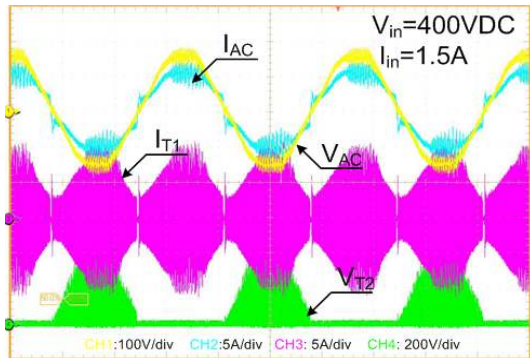


(a) 입력전압($V_{in} : 350VDC$), 입력전류 ($I_{in} : 1.5A$)

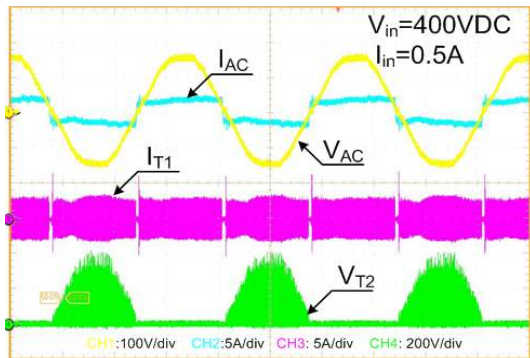


(b) 입력전압($V_{in} : 350VDC$), 입력전류 ($I_{in} : 0.5A$)

그림 6. 350VDC 입력전압(V_{in})에서 PCS 세부 실험과형

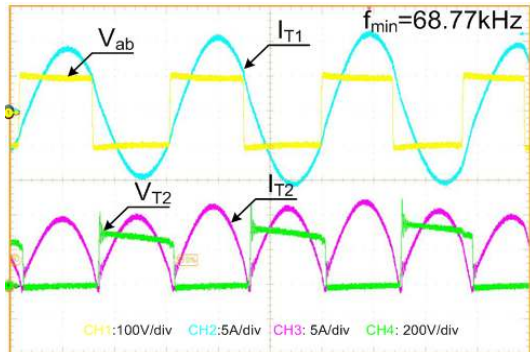


(a) 입력전압(V_{in} : 400VDC), 입력전류 (I_{in} : 1.5A)

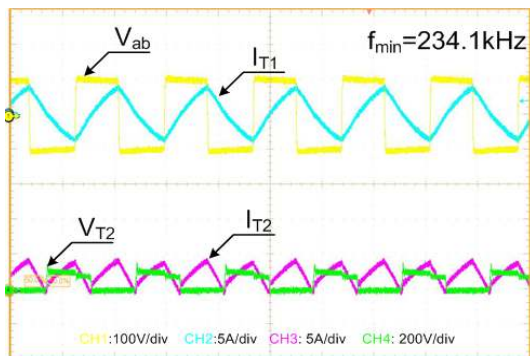


(b) 입력전압(V_{in} : 400VDC), 입력전류 (I_{in} : 0.5A)

그림 7. 400VDC 입력전압(V_{in})에서 입력 정 전류(I_{in}) 제어상태 따른 110VAC/60Hz 계통연계 PCS 실험파형



(a) 입력전압(V_{in} : 400VDC), 입력전류 (I_{in} : 1.5A)



(b) 입력전압(V_{in} : 400VDC), 입력전류 (I_{in} : 0.5A)

그림 8. 400VDC 입력전압(V_{in})에서 입력 정 전류(I_{in}) 제어상태 따른 110VAC/60Hz 계통연계 PCS 세부 실험파형

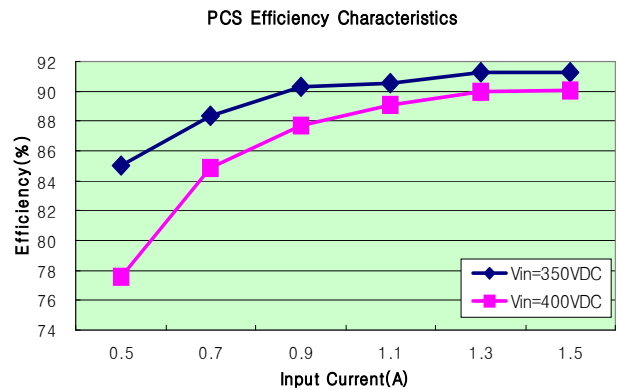


그림 9. 효율특성

4. 결론

본 논문에서는 구성부품의 최소화 및 단가저감을 위해 Half-bridge LLC 공진인버터와 계통연계(110VAC/60Hz)를 위한 Cyclo-converter로만 구성된 고효율의 High Frequency Link PCS (Power Conditioning System)에 대한 회로를 제안하여 700W PCS 시제품을 제작하였고 110VAC/60Hz 계통연계 실험적용 하였다.

5. 참고문헌

- [1] M. Cacciato, A. Consoli, etc., "A Digitally Controlled Double Stage Soft Switching Converter for Grid-connected Photovoltaic Applications" IEEE APEC, pp 141~147, 2008.
- [2] Yong-Ho Chung, Bong-Soo Shin, Gyu-Hyeong Cho, "Bilateral Series Resonant Inverter for High Frequency Link UPS", 1989. IEEE PESC '89, vol.1, pp 83~90, 1989
- [3] 서현우, 권정민, 김응호, 권봉환, "모듈형 계통연계 태양광 PCS", 전력전자학회논문지 제13권 제2호, pp119~127, 2008. 4.
- [4] Song Deng, Hong Mao, Joy Mazumdar, Issa Batarseh, Kazi Khairul Islam, "A New Control Scheme for High-frequency Link Inverter Design", IEEE APEC'03, pp 512~517, 2003.
- [5] Joy Mazumdar, Issa Batarseh, Nasser Kutkut, Osman Demirci, "High Frequency Low Cost DC-AC Inverter Design with Fuel Cell Source for Home Applications", IEEE IAS Volume 2, pp 789~794, 2002.

이 논문은 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력 연구원 (R-2005-B-117)의 주관으로 수행된 과제임