

저가격 고 신뢰성의 400Hz 전원의 무순단 전력절환용 개선된 동기화 기법

정석연¹, 현동석[†]

An Improved Synchronization Control Scheme of a Low Cost 400Hz Power Supply for No-Break Power Transfer

Seok-Eon Joung¹ and Dong-Seok Hyun[†]

Abstract

This study proposes an improved synchronization control scheme for a low-cost 400Hz power supply for a no-break power transfer system. In the case of aircraft applications, the 400Hz power supply called ground power units is accepted and used as the external electrical power system during stopovers on ground. A momentary break in the supply occurs when shifting from one power source to another. To allow shifting without a break in the supply, the two power sources are momentarily connected in parallel. The proposed synchronization control is achieved by connecting an existing synchronization bus to the voltage zero-crossing signal of a generator power with discrete logic ICs and analog circuits. Therefore, unlike expensive controllers, such as DSP and CAN, the proposed control scheme is rather simple and may decrease operational cost. The practical feasibility of the proposed control scheme is proven by experimental results.

Key words: Ground power unit(GPU), No break power transfer(NBPT), Static transfer switch(STS)

1. 서 론

400Hz 전원장치의 경우 대부분 군사용 또는 항공기용 레이다 전원으로 고 신뢰성이 요구된다. 이러한 부하장비는 이동을 전제로 시스템의 구성 및 운용상 발전기 전원으로 운전되는 것이 보통이며 지상에 머무는 경우에 한하여 전력변환기의 전력을 사용한다. 이러한 의미로 400Hz용 반도체 전력변환기를 지상전원장치(Ground Power Unit)라고 별도 호칭 한다^{[1][2]}.

대부분의 400Hz 전원장치 역시 그 신뢰성을 높이기 위하여 병렬 운전 구성으로 운전되며 이를 위해 다양한 병렬운전 기법이 연구 되어 적용되고 있다. 병렬 운전 시 가져야 할 주요 기능은 동기화 및 부하분담으로 이제까지 많은 연구가 진행^{[3][4]}되어 왔으며 최근에는 병렬

운전 순환전류를 저감시키기 위하여 DSP 및 CAN 통신을 이용하는 등 고가격, 고기능의 제어기 및 기법^[5]이 발표되고 있다. 이와 반대로 간단한 제어기 및 제어기법도 연구되어 동기버스(SYNC_BUS)를 이용한 동기화 방법^[6]과 전류제어루프 없이 자기(magnetic) 회로만으로 병렬 부하를 분담하는 방법^{[7][8]}에 대하여도 활발히 진행되어 왔다.

이러한 운전기법은 주로 인버터들의 병렬운전에 초점을 맞추고 있으나 이 전원을 사용하는 레이다나 항공기 장치 등은 대부분 자체적으로 발전 설비를 보유하고 있는 점에 비추어 지상전원에서 발전기로 전력을 무순단으로 절체 할 수 있는 기능이 필요하다^[1].

SYNC_BUS를 이용하는 병렬운전 기법은 저가격으로 강인한 동기화 기능을 수행한다. 반면 GATE LOGIC과 연계되어 동일한 인버터간의 동기운전만을 제공하며 그 또한 추적 동기기능으로 발전기와 같이 SYNC_BUS 기능이 없는 전원에 대하여는 동기화 기능을 수행할 수 없는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 강인하고 저가로 구현 가능한 NBPT(No-Break Power Transfer)용 인버터 동기기법을 제안한다. 기존의 동기버스(SYNC_BUS) 방식의 동

Paper number: TKPE-2014-19-5-11

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: dshyun@hanyang.ac.kr, Dept. of

Electrical Eng., Hanyang University

Tel: +82-2-2220-0341 Fax: +82-2-2220-0532

¹ Dept. of Electrical Eng., Hanyang University

Manuscript received Sep. 1, 2014; accepted Sep. 11, 2014

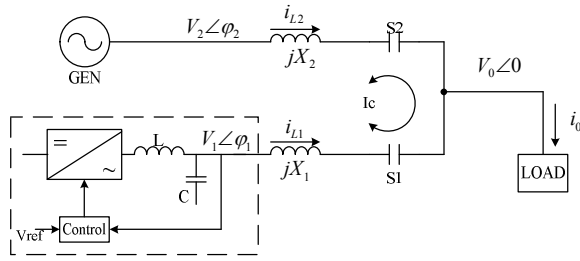


Fig. 1. 400Hz power supply system.

기화 회로에 발전기 전원의 Zero-Crossing 신호를 동기시켜 절환 순간의 전력 변동을 최소화 한다. 일반의 Counter Logic으로 구성된 동기화 회로는 전압 제어용 OP-Amp와 어울려 인버터 Gate용 PWM 신호를 만들어 내며 Software를 사용하는 DSP 또는 MCU 보다 저 가격으로 열악한 환경 에서도 강인한 동기화 동작을 가능하게 한다.

2. 시스템 검토 및 구성

발전기와 지상전원장치(GPU)는 그림 1과 같이 시스템이 구성되며 시스템 운용상 동시에 운전 되지 않으며 상용 UPS(Uninterruptible Power Supply)처럼 항시 동기를 추적해야하는 번거로움이 없다.

이러한 점이 동기화 회로를 간략히 할 수 있는 전제 조건이다. 전력 변환기를 사용하다가 이동 등의 이유로 발전기 전력이 필요하면 발전기 기동 후 절체 판단 기능 의존하여 간단한 스위치로 절환 한다.

두개의 독립된 교류전원의 동질성을 검증하는 것이 교류 전원 절체 하는 선결 조건이다. 이를 위해 지상전원장치 발전기의 전압, 주파수 및 위상을 추종하게 된다. 이중 주파수, 위상은 동기화 회로의 기능으로 절환 동작의 가장 중요한 요소이다. 이러한 위상 편차는 절환 동작 시 식(1)에서와 유효전력을 발생시키게 되고 편차가 클 경우 막대한 순환 전력으로 발전기나 지상전원장치의 고장을 유발 할 수 있다. 이에 비해 전압차는 절환시 식(2)와 같이 순환 무효전력이 발생 하나 지상전원장치나 발전기에 미치는 영향이 상대적으로 적다.

$$P_1 = \frac{V_1 V_0}{X_1} \sin \phi_1 \quad (1)$$

$$Q_1 = \frac{V_1 V_0 \cos \phi_1 - V_0^2}{X_1} \quad (2)$$

NBPT를 위해 설계 되는 대부분의 절환장치는 2개의 스위치를 일정 시간 Overlap 되도록 동작시켜 No-Break 동작이 되도록 한다. 성공적인 NBPT를 위해서는 주파수 및 동기화 기능 못지않게 스위치의 절환속도 역시 중요한 요소이다.

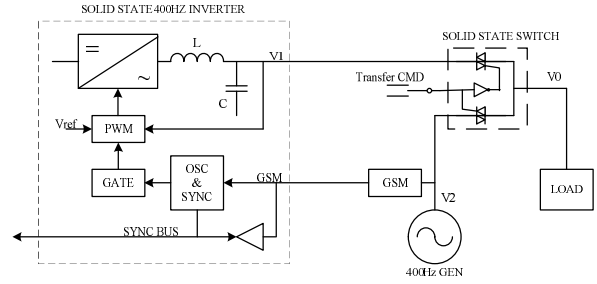


Fig. 2. Proposed 400Hz NBPT system.

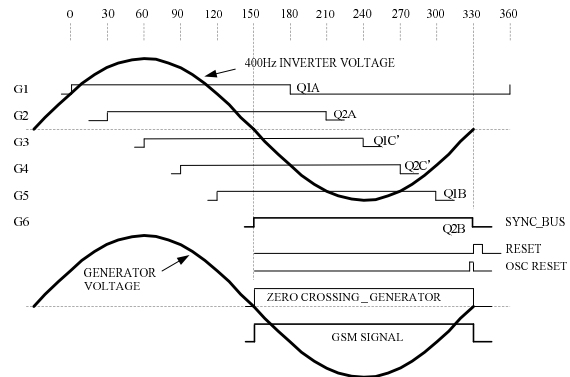


Fig. 3. The wave forms of inverter and generator.

3. 제안하는 NBPT 절환 시스템

3.1 시스템 구성

그림 2는 제안된 시스템으로 절환 순간의 순환전력을 최소화하기 위하여 GSM(Generator Synchro Module)으로 발전기 측의 위상을 모니터링 하여 400Hz 인버터의 위상을 제어하고 두 전압의 위상이 일치되면 Transfer CMD(Command)를 발생 시키고 반도체 스위치(Solid State Switch)를 사용하여 단시간 안에 절환을 완료하도록 한다.

3.2 동기제어

동기제어는 SYNC_BUS 동기회로를 기본으로 한다. 그림 3은 인버터와 발전기의 동기제어를 위한 위상관계도이다. SYNC_BUS의 Down Edge에서 조기 Reset 또는 지연 Reset 동작으로 위상제어가 수행 된다.

Gate Signal은 그림 4와 같이 수정진동자 X-tal을 이용한 발진회로(OSC)에서 출력되는 고 주파수 Clock을 14bit의 Binary Ripple Counter와 Ring Counter를 사용하여 6상의 Gate Signal과 SYNC1 신호를 만들고 이것으로 SYNC_BUS를 만든다. 각 장비는 SYNC_BUS와 자신의 SYNC Signal을 비교하여 위상을 조절한다.

SYNC_BUS 동기 방식의 기본 동작은 지상(Lagging) 장비가 진상(Leading) 장비를 추적하는 추적동기방식으로 본 논문에서는 그림 4의 PCC(Phase Control Circuit)Logic을 추가 하고 발전기전압을 Zero-Crossing

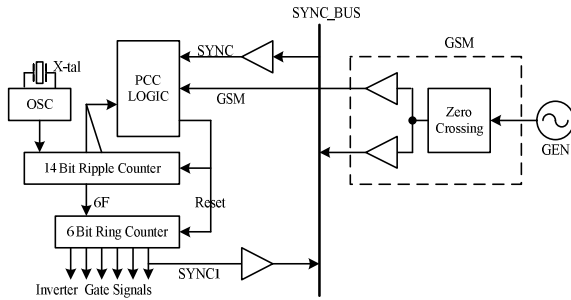


Fig. 4. Block diagram of proposed synchronize control.

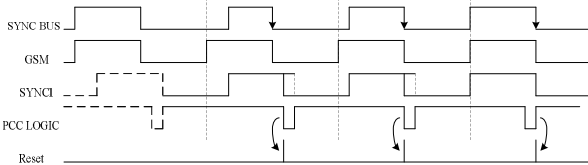


Fig. 5. Synchronization timing signals at leading.

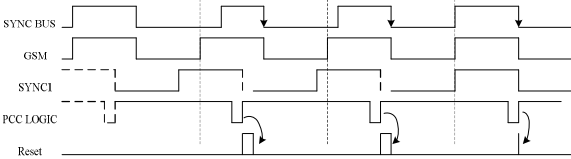


Fig. 6. Synchronization timing signals at lagging.

하여 GSM 신호를 만들어 SYNC_BUS에 연결하여 기존의 SYNC_BUS 를 이용한 추적 동기 기능을 가능하게 하고 동시에 지연동기가 가능하도록 하였다.

그림 5는 발전기가 진상 운전 중인 경우의 동작으로 인버터는 지정된 Slew Rate 로 추적 한다. PCC LOGIC 은 Gate Signal의 마지막 에 설정된 PCC 신호와 SYNC BUS신호를 비교하여 지상인 경우 Down Edge에서 Reset 신호를 발생하여 인버터의 위상을 앞당긴다.

그림 6은 발전기가 지상 운전 중인 경우의 동작으로 PCC LOGIC은 설정된 PCC 신호와 GSM 신호를 비교하여 Reset 신호를 지연시켜 인버터의 위상을 지연시킨다.

4. 시스템 구현

제안된 시스템을 검증하기 위하여 전력절환장치 및 인버터장치의 회로를 선정 하고 구현 하였다.

4.1 전력 절환 장치

절환스위치는 교류전력 제어가 가능한 반도체 소자인 제어정류기(Thyristor)를 이용하여 그림 7과 같이 직렬로 연결한 정지형 절환스위치STS(Static Transfer Switch)로 구성하여 삼상 전력의 절환이 가능하도록 구성 하고 전압의 위상이 일치하는 경우 삼상 일괄하여

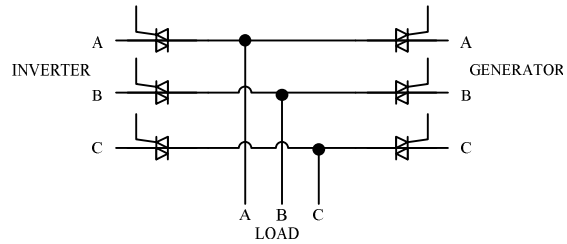


Fig. 7. Static transfer switch.

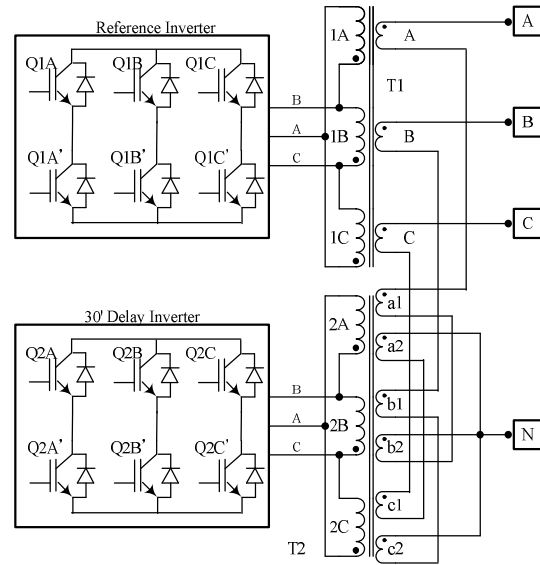


Fig. 8. Diagram of 6-level inverter.

절환 명령 신호를 발생하는 최소한의 기능으로 구성 한다.

4.2 인버터 장치

인버터는 간단한 동기제어기와 연동되도록 저주파 스위칭인버터로 설계하고 양질의 출력전압파형을 얻을 수 있는 다중인버터 방식을 채용한다. 다중인버터방식의 단점은 다수의 전력변환소자가 필요하다는 점이나 본 논문에서는 동기제어기와의 연계 시 단순, 강인성 등의 장점으로 채택 되었으며 특히 양질의 출력 전압을 쉽게 구현 할 수 있다는 장점이 있다.

그림 8은 논문에서 구현된 인버터 장치로 두 개의 삼상 인버터로 구성된 다중인버터 이다.

그림 4에서 생성된 6상의 Gate Signal을 이용하여 그림 8의 Reference 와 Delay 인버터를 구동 시키면 Gate Signal의 순서로 인해 Delay 인버터는 30도 지연되어 동작하고 변압기 2차 권선전압을 직렬로 연결하여 벡터 합산하면 그림 9에서와 같이 교류 출력 전압이 생성된다.

올바른 정현파 출력합성전압을 얻기 위해 인버터 변압기의 2차 권선의 전압은 그림 10의 벡터 크기에 맞도록 설계 한다.

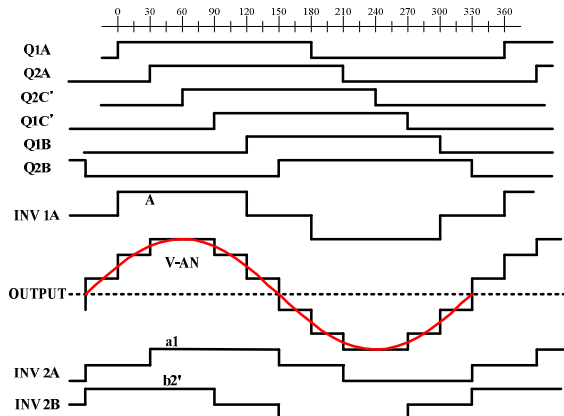


Fig. 9. Inverter gates and output voltage.

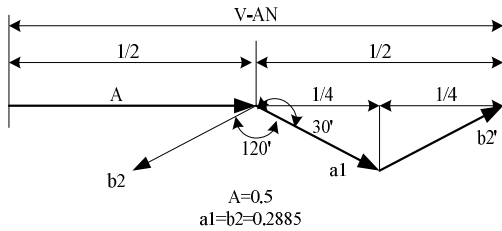


Fig. 10. Vector diagram of output voltage.

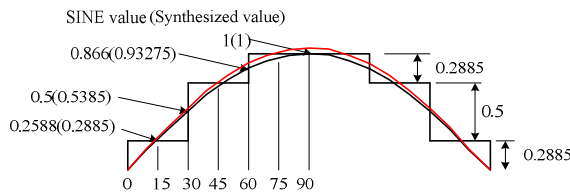


Fig. 11. Sine-wave Vs synthesized.

합성된 전압과 정현파전압을 비교하면 그림 11처럼 단순 저주파스위칭으로 정현파 전압이 구현된 것을 알 수 있다. 다중인버터의 수를 늘리는 만큼 보다 정현파에 가까운 전압을 합성 해 낼 수 있다.

5. 실험

제안하는 알고리즘을 검증하기 위하여 표 1의 정격을 갖는 인버터와 반도체절환장치(STS)를 제작하고 Load Bank를 구비하여 절환 및 동기기능 확인을 위한 실험을 진행 하였다.

그림 12는 인버터용 IGBT STACK 및 Gate Driver Board이며 그림 13은 절환 장치용 Thyristor 및 Gate Driver 이다.

동기절환기능을 실험하기 위하여 STS를 이용하여 전력을 절환 하고 출력 전압(Load Voltage L-L)과 부하에 공급되는 전류(Load Current)파형을 측정하고 STS의 동작 위치에 따라 인버터전류(Inverter Current)와 발전기 전류(Generator Current)를 비교하여 두 전원이 서로

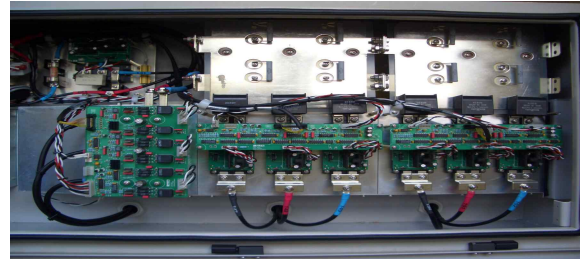


Fig. 12. 400Hz inverter.

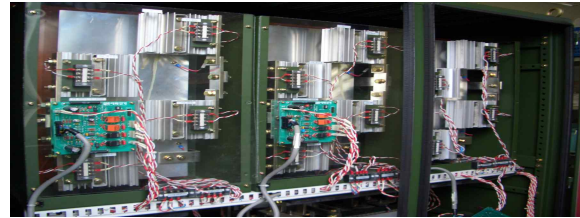


Fig. 13. 400Hz static transfer switch.

TABLE I
RATINGS OF EXPERIMENTAL SYSTEM

Unit	Rating
Inverter	100 [kW]
Generator	90 [kW]
Static Switch	520 [A]
Load Bank	300 [A]
System Frequency	400 [Hz]

동기되고 연속적으로 부하전력을 공급하는 NBPT 기능의 수행 여부를 확인 하였다.

그림 14는 부하전력을 인버터에서 발전기로 절환 시켜 절환 전 후의 부하전류의 연속성을 확인 한 파형으로 절환 전 인버터에서 공급되던 부하전류는 절환 후 발전기 전류로 바뀌어 연속적으로 부하전류가 공급되고 있음을 확인 할 수 있다.

그림 15에서는 이와 반대로 발전기에서 인버터로 절환 하여 부하전류가 발전기에서 인버터로 연속적으로 공급됨을 확인 할 수 있다.

그림 14 및 그림 15를 통해 제안된 시스템이 NBPT를 위한 동기화 기능을 성공적으로 수행하였음을 확인 하였다.

그림 16은 동기화된 두 개의 전원의 위상차를 측정하기 위해 영(0)전압 부근을 확대한 파형으로 위상편차는 제안된 동기화 기법 그림 3에 표현된 OSC RESET으로 사용된 최소펄스폭에 기인하는 것으로 실험결과 14uSec로 측정 되었으며 이를 동기달성 위상차로 환산하면 동기각=(14e-6/2.5e-3)*180deg=1.008[deg] 로 동기 기능이 성공적으로 수행되고 있음을 확인 할 수 있다.

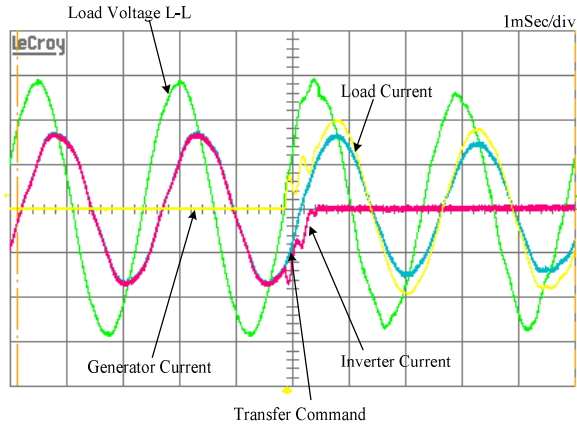


Fig. 14. Voltage and current waveform when load transfer to generator.

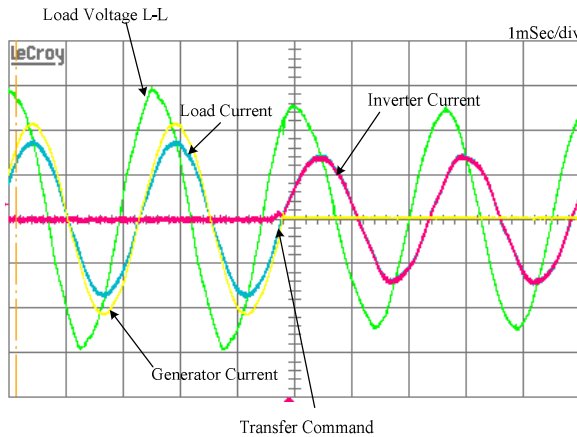


Fig. 15. Voltage and current waveform when load transfer to inverter.

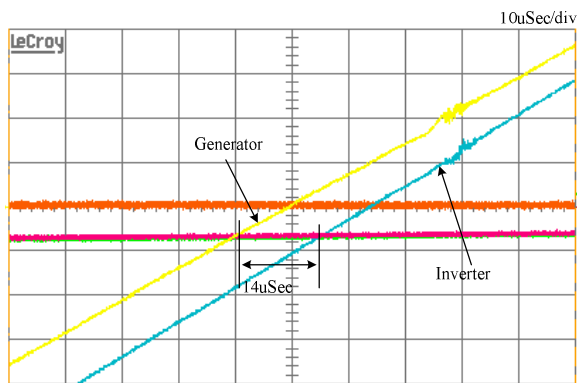


Fig. 16. Phase difference of voltage between inverter and generator at synchronized.

6. 결 론

제안된 동기 기법은 분석 및 실험을 통해 실용적인 동기 능력을 확인 하였다. 일반 로직 IC로 구성된 동기 제어 회로는 DSP 사용 제어기 대비 충분히 사용가능함을 확인 하였다. 반도체 소자의 통전 손실을 최소화 하

기 위하여 절환 후 기계적 스위치를 병렬로 투입하는 것도 시스템 신뢰도 증가 효과를 볼 수 있다.

References

- [1] J. S. Breit and J. H. Doty, "Aircraft no-break power transfer revisited," *Aerospace and Electronics Conference, 1990. NAECON 1990, Proceedings of the IEEE 1990 National*, Vol. 1, pp. 410-416, May 1990.
- [2] U. B. Jensen, F. Blaabjerg, and J. K. Pedersen, "A new control method for 400-Hz ground power units for airplanes," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 36, No. 1, pp. 180-187, Jan./Feb. 2000.
- [3] J. F. Chen and C. L. Chu, "Combination Voltage Controlled and Current Controlled PWM Inverters for UPS Parallel Operation," *IEEE Transactions on P.E.*, Vol. 10, No. 5, pp. 547-558, Sep. 1995.
- [4] M. Prodanovic, T. C. Green, and H. Mansir, "A survey of control methods for three-phase inverters in parallel connection," *Power Electronics and Variable Speed Drives, Eighth International Conference (IEE Conf Publ. No. 475)*, pp. 472-477, Sep. 2000.
- [5] K. H. Kim and D. S. Hyun, "A High Performance DSP Voltage Controller with PWM Synchronization for Parallel Operation of UPS Systems," *Power Electronics Specialists Conference, 2006. PESC '06. 37th IEEE Publication*, pp. 1-7, Jun. 2006.
- [6] Z. Qinglin, C. Zhongying, and W. Weiyang, "Improved Control for Parallel Inverter with Current-Sharing Control Scheme," *IPEMC '06*, Vol. 3, pp. 1-5, Aug. 2006.
- [7] C. Liangliang, X. Lan, and Y. Yangguang, "A novel parallel inverter system based on coupled inductors," *INTELEC'03*, Vol. 3, pp. 46-50, Oct. 2003.
- [8] C. Mak and L. Bolster, "Bus-tie synchronization and load share technique in a ring bus system with multiple power inverters," *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2005. APEC 2005. Twentieth Annual IEEE*, Vol. 2, pp. 871-874, Mar. 2005.

정석언(鄭錫彦)



1960년 10월 30일생. 1983년 숭실대 전기공학과 졸업. 2002년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 1982년~1990년 이화전기공업 연구소 대리. 1993년~1999년 수영전기기업 연구소장. 2003년~현재 이화전기공업 기술본부장, 기술연구소장.

현동석(玄東石)



1950년 4월 8일생. 1973년 한양대 전기공학과 졸업. 1978년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1984년~1985년 미국 토레도대학교 교환교수. 1988년~1989년 원혜공과대학교 교환교수. 2003년 IEEE, Fellow Member. 1979년~현재 한양대 전기생체공학부 교수. 2000년 당 학회 회장 역임.