

분산형 N+X 리던던트 UPS 시스템의 개발

조준석, 최규하*

(주)엔시스 기술연구소, 건국대학교 전기공학과*

Distributed N+X Redundant UPS System

J.S. Cho, G.H. Choe*

Ensys Co. LTD, Konkuk University*

ABSTRACT

This paper presents a non-electrical isolated prototype of N+X redundant UPS with two-quadrant converter. Proposed topology has multi-functions of battery charge and discharge regulation, operates with a near unity input power factor, compensates unbalanced voltage on DC bus capacitors, and regenerates the circulating active power among the inverters into battery or grid. And furthermore, this system adopts a novel wireless parallel operation algorithm of N+X redundant UPS system with no control interconnections. Simulation and experiment results are provided in this paper to prove the validity of proposed topology and wireless control algorithm.

1. 서 론

최근 전원이상에 대비한 무정전전원장치(UPS)의 필요성이 더욱 증가하고 있는 추세이며, 특히 정보화 시스템과 같이 전원상태에 민감한 부하의 신뢰성을 확보하기 위한 리던던시(Redundancy) 개념의 UPS가 도입되고 있다. 특히 분산형 N+X 리던던트 UPS 시스템은 모듈간에 완전한 독립성을 보장하고 원활한 확장성과 무한의 여분을 갖는 고신뢰성의 전원장비를 구축하는 방식이다. 또한 N+X 리던던트 UPS는 분산된 형태의 독립기능을 수행하는 모듈구조로 구성되며 확장성을 위해 각 모듈은 완전한 온-라인 UPS의 기능을 갖추어야 한다. 즉 입력전원이 정상상태일 경우는 UPS 모듈의 역률보상(PFC) 컨버터에 의해 교류입력이 직류전원으로 정류되어 DC 링크 커패시터에 전달된다. 또한 상용전원 상태에서는 배터리 충전기가 일정한 충전전류에 의해 배터리 모듈을 충전하지만 입력전원이 정전되면 절환 스위치에 의해 배터리 전력으로 다른 모듈과 병렬로 접속된 인버터가 구동된다. 일반적으로 변압기의 무게와 크기의 제약으로 전파방식의 시스템은 모듈형 UPS에 적용하기 어려운 단점을 가

진다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 변압기를 제거할 수 있는 반파방식의 UPS 시스템에 관한 많은 연구가 이루어졌다.[2-4] 특히 반파방식의 시스템은 그림 1과 같이 컨버터 입력과 인버터 출력 그리고 직류전압의 중점점을 공유함으로써 입출력 사이에 절연 변압기를 생략할 수 있고, 전파방식에 비해 회로구성이 간단하고 스위칭 소자의 수가 적어 UPS 모듈의 경량화와 저가격화가 가능한 방식이다. 특히 단일 스위치와 다이오드의 조합으로 상전모드에서는 PFC 기능을 수행하고 정전모드에서는 부스트 컨버터로 동작하여 배터리 전력을 인버터에 공급하는 방식이 소개되었다.[2] 또한 정전모드에서 배터리 운전시 발생하는 직류 커패시터 사이의 전압 불균형을 보정할 수 있는 토폴로지에 관한 연구가 수행되었다.[3] 그러나 기존의 반파방식의 회로구성은 전력의 흐름이 입력에서 출력으로 전달되는 단방향 특성을 가지는 단독 온-라인 UPS를 대상으로 최적화 되어있어 병렬 UPS에 적용하기 어려운 단점을 가진다. 즉 병렬 인버터 사이에 흐르는 순환 유효전력을 전원으로 회생하거나 배터리에 충전할 수 있는 양방향 전력제어가 가능한 토폴로지가 적용되어야 한다.

본 논문에서는 N+X 리던던트 UPS 시스템에 2상한 컨버터를 적용하여 배터리의 충방전이 가능하고 교류입력의 역률보상과 직류 커패시터 사이의 전압 불균형을 보정할 수 있으며, 인버터 사이에 발생하는 순환 유효전력을 배터리에 충전하거나 전원으로 회생시킬 수 있는 구조로 구성되어 모듈방식의 병렬운전이 가능한 토폴로지를 제안하고자 한다. 또한 기존에 사용된 부하분담용 신호선을 제거하고 독립적인 운전을 수행하기 위해 새로운 형태의 wireless 병렬제어 알고리즘을 적용하였다. 제안된 토폴로지와 제어구조의 타당성을 검증하기 위해 시뮬레이션과 실험결과를 제시하였다.

2. N+X 리던던트 UPS 시스템의 구성

본 논문에서 제안하는 리던던트 UPS 시스템은 그림 1과 같이 반파 PFC 컨버터와 인버터, 2상한 컨버터 그리

어 기준 전류값을 형성한다. 먼저 상전모드에서 2상한 컨버터의 제어기는 배터리 충전제어를 수행한다. 식(4)와 같이 배터리의 부동전압 V_{BAT}^* 을 배터리 전압제어기의 제어 기준값으로 설정하여 제어루프를 실행하면 충전전류의 한계값($I_{LBC\min}$)에 의해 정전류 방식으로 충전이 이루어지고 배터리 전압이 부동전압에 근접하면 충전전류가 감소하면서 정전압 방식으로 배터리를 충전한다.

$$I_{LBC}^* = (k_{pv} + \frac{k_{iv}}{s})(V_{BAT}^* - V_{BAT}) \quad (4)$$

여기서, $I_{LBC\min} < I_{LBC} < 0$

상전모드에서 2상한 컨버터의 또 다른 중요한 기능은 위에서 언급한 순환 유효전력의 회생동작을 수행하는 것이다. 과도시에 발생하는 순환 유효전력을 전원측으로 회생할 수 없는 조건에서는 이 에너지를 배터리로 충전해야 한다. 식(5)와 같이 전원의 상태에 따라 직류 커패시터 전압제어기의 리미터 한계값을 조정함으로써 회생동작을 구현한다. 즉 상전모드에서는 리미터 값이 (-)한계치만 존재하므로 배터리 전류는 충전동작만을 수행하며, 유효전력이 유입되어 직류전압이 상승하면 식(5)의 회생전류 기준값 I_{LBD}^* 가 증가한다. 충전전류 I_{LBC}^* 와 회생전류 I_{LBD}^* 의 값이 가산되어 식(6)의 기준 전류값이 생성되고 실제로 전류제어가 이루어진다. 특히 순환 유효전력이 발생하였을 경우에는 식(5)의 회생충전 제어기가 지배적으로 동작되므로 배터리 전압제어기와 간섭을 일으키지 않는다.

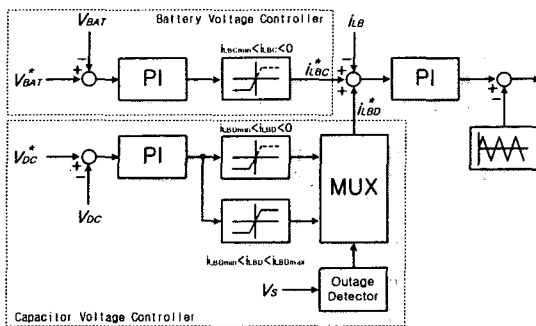


그림 3. 2상한 컨버터의 제어 블록도
Fig. 3 Control block Diagram of bidirectional converter

$$I_{LBD}^* = (k_{pv} + \frac{k_{iv}}{s})(V_{DC}^* - V_{DC}) \quad (5)$$

여기서, 상전모드 $I_{LBD\min} < I_{LBD} < 0$

정전모드 $I_{LBD\min} < I_{LBD} < I_{LBD\max}$

$$V_{CONB} = (k_{pi} + \frac{k_{ii}}{s})(i_{LBC}^* + i_{LBD}^* - i_{LB}) \quad (6)$$

정전모드에서는 식(5)와 같이 직류 전압제어기의 리미터가 양방향의 한계치로 설정되므로 실제로 2상한 컨버터는 부스트 모드로 동작하여 직류전압을 충전하면서 인버터에 전력을 공급한다. 물론 정전모드에서는 자유로이 충전이 가능하므로 순환 유효전력의 회생동작 또한 수행될 수 있다. 또한 2상한 컨버터의 방전시 직류전압의 불균형이 발생하면 그림 1의 DB1과 DB2를 사용하여 C1과 C2의 전압편차를 보상한다.

3.3 인버터 제어 알고리즘

제안하는 인버터의 병렬운전제어는 선행연구[1]에서 적용한 Q-V와 P- ω 수하방식으로 인버터 사이의 전력편차를 제거하지 않고 삽입된 가상 임피던스와 연계하여 유효전력 P와 무효전력 Q의 상호간섭성분을 보상하는 새로운 형태의 전압-주파수 수하제어 방식을 적용하였다. 실제 병렬 인버터는 순수한 인덕턴스로 커플링되지 않으므로 Q-V와 P- ω 관계 뿐만 아니라 Q- ω 와 P-V의 간섭성분을 포함하므로 식(7)과 같이 P,Q에 의한 전압-주파수 편차의 행렬식을 적용하여 간섭성분을 제거한다.

$$\begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta V_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad (7)$$

그림 4는 P,Q의 간섭성분을 고려한 새로운 병렬운전 알고리즘을 나타내는 블록선도이다.

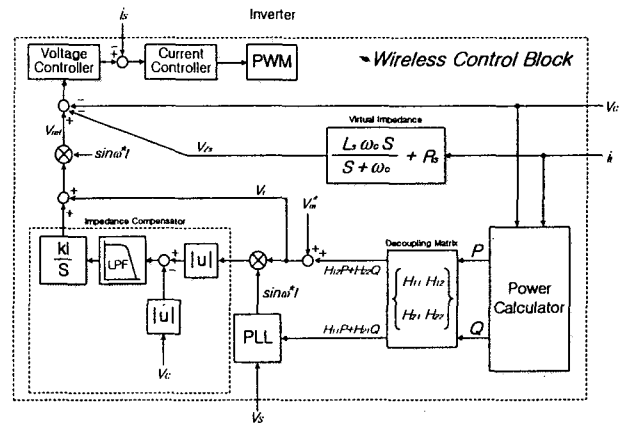


그림 4. Wireless 병렬운전 알고리즘 블록도

Fig. 4 Control block Diagram of wireless parallel operation algorithm

그림 4와 같이 간섭성분을 보상하는 새로운 형태의 전압-주파수 수하관계식을 정리하면 식(8), (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$V_r = V_m^* + H_{12}P + H_{22}Q \quad (8)$$

$$\sin \omega^* t = \sin \left[\frac{1}{S} (k_{pv} + \frac{k_{ip}}{S}) \Delta\theta + H_{11}P + H_{21}Q \right] \quad (9)$$

4. 시뮬레이션 및 실험결과

본 논문에서 제안하는 N+X 리던던트 UPS 시스템의 운전특성을 검증하기 위해 표 1과 같이 시스템 파라미터를 설정하여 PFC 컨버터와 2상한 컨버터의 경우는 정격부하 조건에서 시뮬레이션을 수행하였고, 인버터의 병렬 운전특성을 평가하기 위해 정격의 50[%]로 저항부하를 인가하여 실험을 수행하였다. 정격무효전력에서 전압안정도 2%를 기준으로 H_{22} 계수와 정격유효전력에서 0.5°의 위상지연을 고려하여 H_{11} 를 설정하였고 간섭계수인 H_{12} 와 H_{21} 은 가상 임피던스의 저항성분을 고려하여 산출하였다.

그림 5는 단독 UPS 모듈의 정전 및 복전운전상태를 나타내고 있다. 상전모드시 PFC 컨버터가 전력을 공급하여 직류전압을 일정하게 제어하고 있으나 정전이 발생하면 2상한 컨버터가 방전모드로 즉시 전환되어 직류전압을 제어하고 배터리 전력을 인버터로 공급하여 정복전이 반복되는 과도상태에서도 직류전압과 인버터의 출력이 항상 일정하게 유지되고 있음을 확인할 수 있다.

표 1. 시스템 파라미터
Table 1 System Parameter

항 목	설정값
모듈별 정격용량	5[kVA]
컨버터 입력전압	220[V]
인버터 출력전압	220[V]
부하역률 (PF)	1.0
배터리 전압	240[VDC]
직류 커패시터 (C_1 / C_2)	3300[μ F]
PFC 컨버터의 인덕터(L_1)	0.8[mH]
2상한 컨버터의 인덕터(L_B)	1[mH]
직류 커패시터 전압(V_{C1}, V_{C2})	400[VDC]
기본주파수의 가상 임피던스 값 (Z_s)	0.02+0.151i
인버터의 필터 인덕터 (L_f)	1[mH]
인버터의 필터 커패시터 (C_f)	60[μ F]
H_{11} / H_{12}	4/3e3, 3.6/3e4
H_{21} / H_{22}	0.9/2e5, 1/2e4
위상 Droop 계수	1/400[rad/kW]

또한 입력전류는 단위역률 운전특성을 보이며, LCL 필터에 의해 입력전류의 THD가 5[%]미만의 제한값을 만족한다.

그림 6은 상전모드시 직류 커패시터에 발생하는 전압편차를 보상하는 제어특성을 보여준다. 무부하에서 정격부하를 투입할 경우 발생하는 반주기구간의 전압 불균형을 제어가 효과적으로 보상하고 있음을 나타내고 있다.

그림 7은 병렬 인버터사이에 위상편차의 초기값을 2°로 설정하고 인버터를 투입할 경우의 과도특성을 나타내

고 있다. 그림과 같이 무부하의 0.1[s]지점에서 인버터를 투입하면 위상편차에 의해 UPS1 모듈에 순환 유효전력이 유입되어 직류전압이 상승되고 이때 2상한 컨버터는 회생 에너지를 배터리에 충전하는 동작을 수행한다. 또한 0.3[s]지점에서 정격부하를 인가하고 0.6 [s] 지점에서 정전모드로 전환할 경우에도 2상한 컨버터는 회생되는 유효전력량과 관계없이 항상 직류전압을 일정하게 유지할 수 있는 운전특성을 보여준다.

그림 8은 병렬 인버터가 투입되는 과도상태에서 인버터 출력전류의 실험과형을 나타내고 있다. 부하분담 신호없이 인버터의 투입이 원활하게 수행됨을 확인할 수 있다. 또한 과도상태에서 가상 임피던스가 순환전류를 효과적으로 차단하는 효과를 볼 수 있다.

그림 9는 저항부하를 정격의 50[%]로 인가한 경우의 병렬인버터의 정상상태 출력전압 및 전류를 나타낸다. 실제 병렬 인버터의 부하분담 편차가 2% 이내로 유지되며 출력전압도 1% 미만의 THD 갖는다.

5. 결 론

본 논문에서는 배터리의 충방전 기능을 갖는 2상한 컨버터를 적용한 N+X 리던던트 UPS 시스템을 제안하였다. 본 논문에서 적용하는 토폴로지는 배터리의 충방전이 가능하고 교류입력의 역률보상과 직류 커패시터 사이의 전압 불균형을 보정할 수 있으며, 인버터 사이에 발생하는 순환 유효전력을 배터리에 충전하거나 전원으로 회생시킬 수 있는 구조로 구성되어 모듈방식의 병렬운전이 가능함을 확인하였다. 또한 기존에 사용된 부하분담용 신호선을 제거하고 독립적인 운전을 수행하기 위해 새로운 형태의 wireless 병렬제어 알고리즘을 적용하여 제안한 토폴로지와 제어구조가 UPS의 병렬운전에 고 신뢰성을 보장할 수 있음을 시뮬레이션과 실험을 통해 확인하였다.

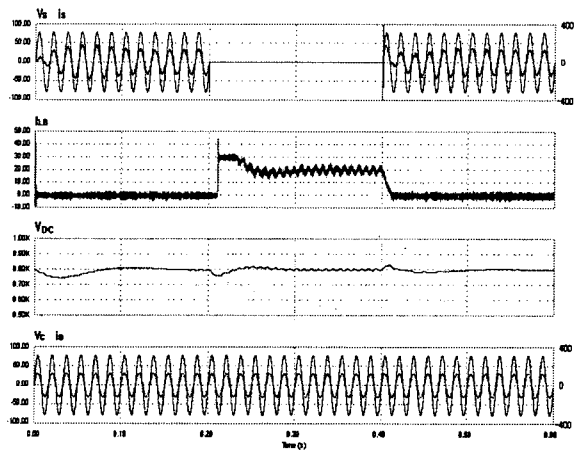


그림 5. 단독 UPS 모듈의 정전 및 복전운전

Fig 5. Waveforms of single UPS under power failure and power recovery

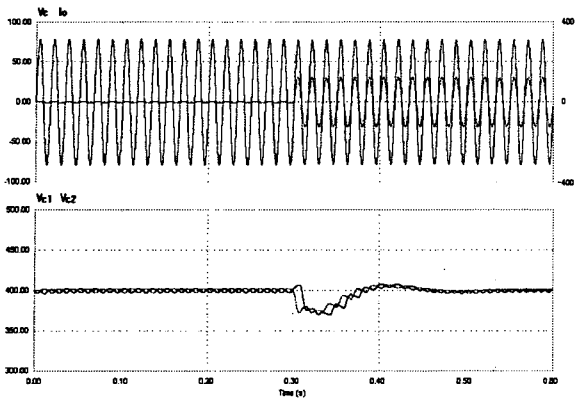


그림 6. 직류 커패시터의 전압편차 보상특성
Fig 6. Compensated voltage deviation of DC Capacitors

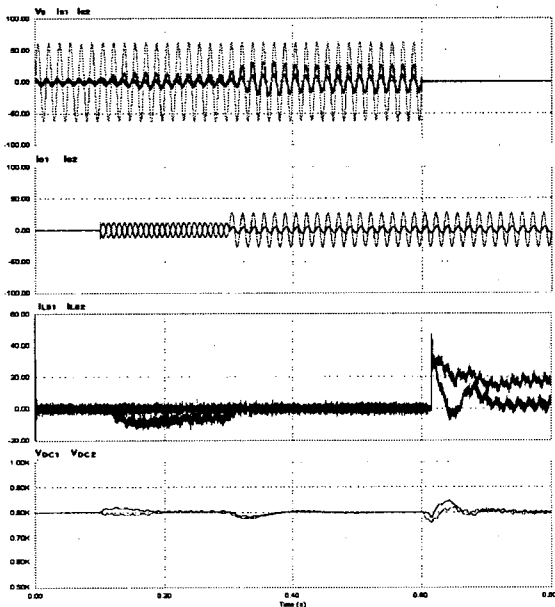


그림 7. 병렬 UPS 시스템의 과도특성
Fig 7. Waveforms of parallel UPS under transient state

19-Jan-03
23:20:25

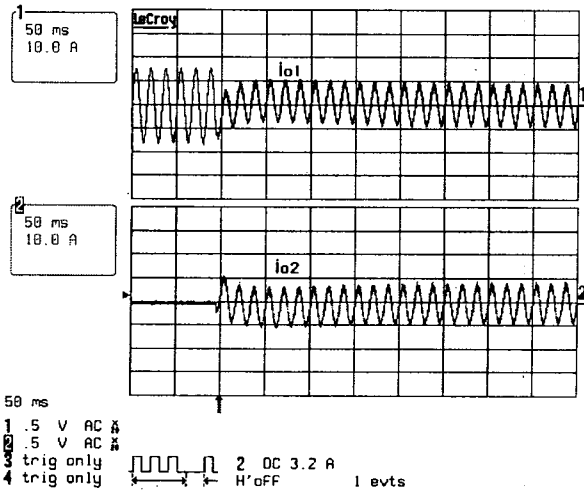


그림 8. 과도상태의 인버터 출력전류
Fig. 8 Inverter current waveforms under transient state

19-Jan-03
23:34:36

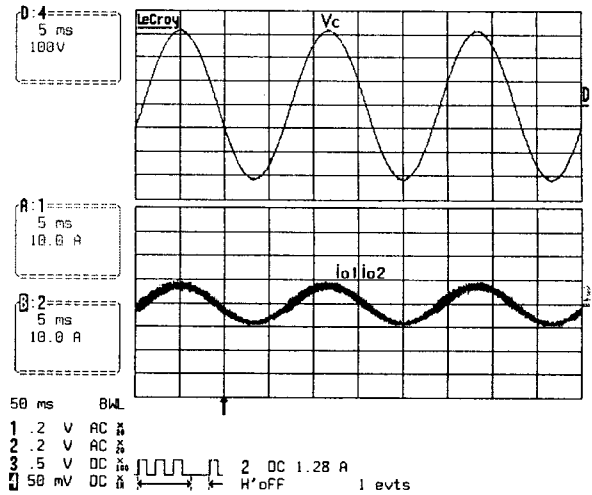


그림 9. 정상상태의 병렬인버터 전압 및 전류파형
Fig. 9 Inverter voltage & current waveforms under steady state

참 고 문 헌

- [1]J.S Cho, G.H Choe,"Wireless Parallel Operation Control of N+1 Redundant UPS System," Trans. on the Korean Institute of P.E, Vol. 7, No. 5, October, 2002, pp. 499-508.
- [2]G.J. Su, T. Ohno,"A New Topology for Single Phase UPS Systems," Conference Record of PCC-Nagaoka, August 1977.
- [3]Gui-Jia Su,"Design and Analysis of a Low Cost, High Performance Single Phase UPS System," APEC'01 of IEEE, vol.2 pp.900-906.
- [4]K.Hirachi,"Cost-Effective Practical Development of High-Performance and Multi-Functional UPS with System Configurations and their Specific Control Implementation," PESC'95 of IEEE, Atlanta,Jun 1995, pp.480-485.