

독립제어구조를 갖는 N+1 모듈형 UPS 시스템의 병렬운전

조준석, 한재원, 최규하*
(주)엔시스, 건국대학교 전기공학과*

Wireless Parallel Operation Control of N+1 Redundant UPS System

Cho Jun-Seok, Han Jae-Won, Choe Gyu-Ha*
Ensysis Co., Kunkook University*

ABSTRACT

In this paper, a novel wireless parallel operation algorithm of N+1 redundant UPS system with no control interconnections is presented. The load sharing of multiple UPS modules are controlled by Q-V droop and P-δ droop algorithm. This algorithm compensates for inverter parameter variation and line impedance imbalances with wireless auto-tuning method. And to increase the reliability of transient characteristic under parallel operation, a virtual injected impedance is proposed to decrease a circulation current between inverter modules. Simulation results are provided to prove the novel wireless algorithm.

1. 서 론

최근 전원의 신뢰성과 더불어 전원이상에 대비한 무정전전원장치(UPS)의 필요성이 더욱 증가하고 있는 추세이며, 특히 정보화 시스템과 같은 중요한 부하에 대한 신뢰성을 확보하기 위한 리던던시 개념의 병렬운전방식이 도입되고있다. 이러한 UPS의 병렬운전시 인버터 사이에 발생하는 순환전류의 제거가 핵심기술이며 이를 구현하기 위해 별도의 부하분담 알고리즘이 필요하다. 지금까지 연구된 병렬운전 알고리즘은 대표적으로 인버터 사이에 발생하는 전력편차를 주고받는 집중식 병렬제어 방식,^[1] 전압제어와 전류제어의 인버터를 결합한 마스터-슬레이브방식^[2] 그리고 주파수 및 출력전압 수하특성(Droop)을 이용한 Wireless 병렬제어방식으로 나눌 수 있다.^[3,4] 특히 그림 1과 같이 전산장비를 위한 랙-마운트 구조의 N+1 모듈형 UPS 시스템은 개별적인 독립성과 원활한 확장성 그리고 정비의 간편성을 위한 핫-스왑(Hot-Swap)구조를 지원해야 한다. N+1 UPS의 개념은 정격용량의 인버터모듈 N개와 여분의 모듈 1개를 추가하여 고신뢰성 전원장비를 구축하는 방식이다. 그러므로 이러한 시스템에 적용될 수 있는 병렬제어 방식은 부하

분담을 위한 신호연결선을 제거한 완전 독립형 제어구조가 유리하다. 본 논문에서는 모듈형 인버터의 병렬운전 제어를 위해 기존에 사용된 부하분담용 신호선을 제거하여 센싱 및 상호간섭에 의한 문제를 해결하고 독립적인 운전을 수행하기 위해 새로운 형태의 제어알고리즘을 제안하고자 한다. 또한 기존의 Wireless 방식의 단점을 보완하기 위해 인버터간 불평형 제거 알고리즘을 적용하여 무효전력편차의 발생을 최소화하는 구조를 가지며, 시스템의 불안정한 과도특성을 완충하는 가상 임피던스를 삽입하여 과도순환전류를 저감하였다. 그리고 가상 임피던스 삽입에 따른 출력전압강하를 보상하기 위해 임피던스 전압강하 보상을 적용하여 정상상태 전압을 안정화시킨다. 또한 주파수 수하제어의 단점인 바이패스와의 위상편차를 저감하기 위해 위상수하 PLL 알고리즘을 적용하여 유효전력편차를 보상하고 정전 및 복전시에 위상보정이 가능한 구조를 제안하였다. 본 연구에서 제안한 병렬제어 알고리즘을 검증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였으며 제어특성을 확인하였다.

2. Wireless 병렬운전제어 알고리즘의 원리

UPS의 병렬운전에서 인버터의 기본과 전압을 \vec{V}_1, \vec{V}_2 로 설정하고 선로 임피던스와 인버터 출력임피던스를 Z_o, Z_{in} 로 가정하면 인버터의 피상전력은 다음과 같다.

$$\vec{S} = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta + j \left(\frac{V_1^2}{X} - \frac{V_1 V_2}{X} \cos \delta \right) \quad (1)$$

식 (1)은 특히 Z_o 의 저항성분을 무시하고 리액티브만을 고려한 병렬운전 관계식이며 순환유효전력은 인버터 사이의 전력각편차(δ)에 비례하여 발생하고 순환무효전력은 인버터 출력전압크기의 편차에 따라 증가하고 있음을 나타낸다. 이러한 전력편차를 교환하는 고전적인 병렬제어 방식과 다른 개념으로 Wireless 제어알고리즘에서는 Q-V와 P- ω 수하방식을 사용하여 순환전류를 제거한다. 식 (2), (3)은 주파수와 출력전압의 수하곡선을 나타낸다.

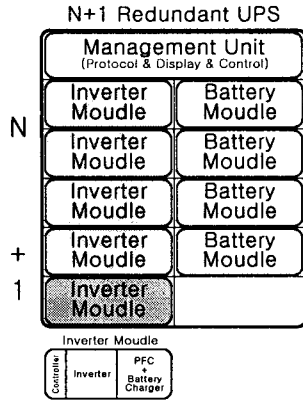


그림 1 Rack-Mount형 N+1 Redundant UPS의 구조
Fig. 1 Structure of rack-mount type N+1 redundant UPS

$$\omega = \omega_o - k_p P \quad (2)$$

$$V = V_o - k_q Q \quad (3)$$

여기서 ω_o : 무부하시 주파수, V_o : 무부하시 출력전압
 k_p : 주파수 수하계수, k_q : 전압 수하계수

그림 2는 주파수-유효전력의 수하곡선을 나타내고 있으며 유효전력에 비례하여 수하계수 k_p 의 기울기로 운전주파수가 감소하는 특징을 가진다. Wireless 주파수 수하방식은 병렬운전시스템 사이에 부하분담 신호선의 상호연결없이 PLL동기만으로 유효전력의 분담을 수행할 수 있다. 그림 3은 전압-무효전력의 수하곡선을 나타내고 있으며 무효전력에 비례하여 k_q 의 기울기로 인버터의 출력전압이 감소하는 특징을 나타낸다. 주파수 수하제어와는 다르게 전압 수하제어기는 PLL과 같은 궤환요소가 없으므로 무부하시 전압편차를 나타내고 있다. 이는 인버터 상호간에 정보를 주고받지 않으면 선로임피던스 편차와 제어변수의 검출오차 및 인버터 이득편차에 의한 무효전력의 불평형 현상은 보상될 수 없음을 의미한다.

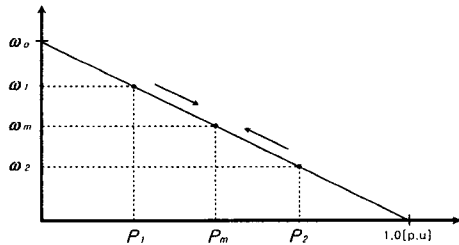


그림 2 병렬운전시 주파수-유효전력 수하특성
Fig. 2 Frequency-real power droop scheme

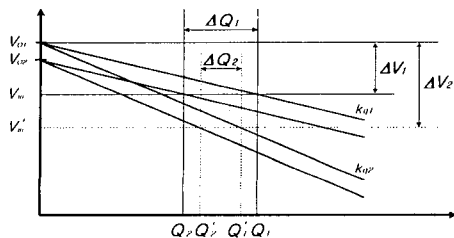


그림 3 병렬운전시 전압-무효전력 수하특성
Fig. 3 Voltage-reactive power droop scheme

그림 3과 같이 기존의 Wireless 제어방식에서는 수하계수 k_q 가 증가할수록 무효전력편차 ΔQ 는 감소하지만 전압편차 ΔV 가 증가하므로 부하용량에 비례하여 전압안정도와 더불어 시스템 과도안정도 역시 감소시켜 병렬운전시스템을 불안정하게 만든다. 그러므로 기존방식의 단점을 보완하기 위해서는 무효전력제어를 위한 별도의 보상 알고리즘이 요구된다.

3. 제안한 Wireless 제어 알고리즘

3.1 병렬인버터의 불평형 제거 알고리즘

본 논문에서는 무효전력편차의 보상과 동시에 우수한 전압안정도를 구현하기 위해 기존의 Q-V 수하제어기의 계수 k_q 를 최소화하고 모든 인버터모듈에서 발생하는 불평형 요소를 제거하는 알고리즘을 적용하였다. 기본원리는 그림 4와 같이 Q-V와 P- ω 수하제어방식을 사용하고 있으나 모든 모듈이 무부하상태에서 병렬운전을 수행하므로 순환유효전력 기준값 P^* 와 순환무효전력 기준값 Q^* 는 0으로 설정되어 식 (4), (5)와 같이 선간전압 220V를 V_{m-1}^* 기준값으로 설정하고 적분보상기를 사용하여 P와 Q를 0으로 수렴시키면 새로운 선간전압 기준값 V_m^* 를 추정할 수 있다. 이러한 방식은 오프라인 튜닝 알고리즘과 유사한 개념으로 적용된다. Wireless 방식으로 오토튜닝된 전압기준값 V_m^* 은 식 (6)과 같이 Q가 0로 수렴함에 따라 인버터간 전압편차 ΔV_Q 가 일정한 값으로 수렴됨으로써 쉽게 추정이 가능해진다. 또한 이와 같은 알고리즘을 적용하면 Q-V 수하제어기 계수인 k_q 를 기존의 Wireless 방식에 비해 크게 감소시켜 전압안정도와 시스템 안정도를 대폭 향상시킬 수 있다.

$$V_m^* = \left[V_{m-1}^* + \frac{k_f(Q^* - Q)}{s} \right] \quad (4)$$

$$V_{ref} = V_m^* \cdot \sin[\omega_o - k_p(P^* - P)]t \quad (5)$$

$$\lim_{Q \rightarrow 0} V_m^* = V_m^* - \Delta V_Q \quad (6)$$

$$V_m^* = V_m^* \quad (7)$$

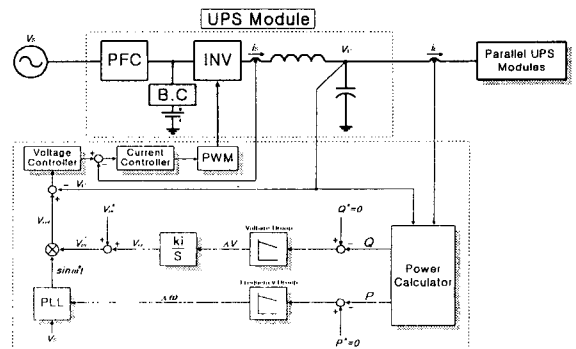


그림 4 Wireless 오토튜닝 알고리즘 블록도
Fig. 4 Control block of wireless auto-tuning method

3.2 가상 임피던스 주입법(Virtual Injected Impedance)

Wireless 방식은 인버터 모듈이 투입 및 절체되는 조건에서는 불안정한 과도상태를 보인다. 그러므로 과도상태에서는 느린 제어응답성을 가진 Wireless 제어가 모든 부하분담을 처리하지 않고 별도의 과도부하분담용 보상기가 필요하다. 본 논문에서는 전체적인 제어기구조를 변형하지 않고 인버터 출력단에 임피던스를 삽입하여 과도 순환전류를 저감하는 방식을 적용하였다. 그러나 실제로 인버터 출력단에 임피던스를 삽입하지 않고 본 연구에서는 가상의 임피던스를 대신 주입한다. 그림 5는 가상의 임피던스가 주입된 병렬인버터의 회로관계를 보여주고 있으며 각각의 인버터는 출력임피던스 Z_o 와 가상의 임피던스 Z_s 로 구성된다. 식(8)은 인버터 출력단자의 전력방정식을 나타내고 있으며 가상 임피던스는 센싱 전압 V_c 와 임피던스 전압강하 V_{zs} 를 사용하여 제어기로 변환되는 출력전압 V_c' 의 형태로 구현이 가능하다.

$$V_c' = V_c + Z_s \cdot I_o = V_c + V_{zs} \quad (8)$$

$$V_{zs} = L_s \frac{di_o}{dt} + R_s i_o \quad (9)$$

$$Z_s = R_s + jX_s = L_s S + R_s \quad (10)$$

가상 임피던스가 순수한 리액터로 구성되면 임피던스에 댐핑이 전혀 없으므로 제어기와는 무관하게 과도응답의 시정수가 커지므로 실제 시스템에는 댐핑저항(R_s)을 첨가하여 식(10)과 같이 임피던스를 설정한다. 그러나 과도응답의 속응성을 위해 댐핑을 증가시키면 앞에서 언급한 P- ω , Q-V의 제어관계에 간섭성분을 일으키게 되므로 댐핑은 전체 임피던스의 10%이내로 설정한다. UPS에 전산장비와 같은 비선형부하가 접속되는 경우 인버터 출력전류는 다량의 고조파를 포함하고 있으므로 순수한 리액터를 임피던스로 주입하지 않고 일정한 차단주파수(ω_c)의 고조파영역 이상에서는 임피던스가 증가하지 않고 일정한 저항성분만을 갖는 임피던스를 설계하여 고조파 전압강하를 저감시켜야 한다. 이를 위해 식(11)과 같이 순수한 리액터에 차단주파수 ω_c 에서 극점을 첨가하여 이득 기울기를 일정하게 만든다.

$$Z_s' = L_s S \frac{\omega_c}{S + \omega_c} + R_s = \frac{(\omega_c L_s + R_s)S + \omega_c R_s}{S + \omega_c} \quad (11)$$

3.3 가상 임피던스 전압강하 보상기

과도상태에서 효과적인 부하분담을 위해서는 임피던스를 정격부하의 1~2%정도 삽입해야 하지만 일반적으로 UPS 시스템의 전압안정도는 2%내에서 제한하기 때문에 Q-V제어기의 전압강하까지 고려하면 위와 같은 수치는 전압안정도를 초과하게 된다.

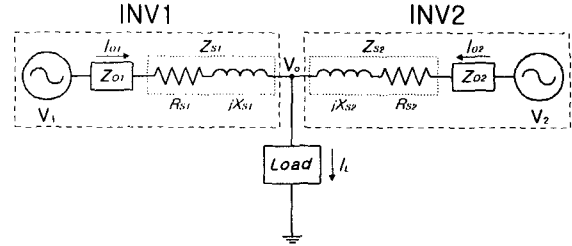


그림 5 가상 임피던스를 고려한 병렬UPS 등가회로
Fig. 5 Equivalent circuit of parallel UPS with virtual injected impedance

그러므로 본 논문에서는 과도상태에서만 가상 임피던스가 주입되어 과도순환전류를 차단하고 정상상태가 되면 임피던스 효과를 제거하여 우수한 정상상태 전압안정도를 유지하도록 하였다. 이러한 가변 임피던스의 특성을 구현하기 위해 그림 6과 같이 임피던스에 의해 전압강하된 V_c 전압과 Q-V 제어기의 출력전압 기준값을 비교하고 저역통과 필터와 적분보상기에 적용하여 전압강화 성분을 보상하는 구조를 사용하였다. 여기서 임피던스 주입방식과 전압강하 보상기는 서로 상반된 개념이므로 상호간섭을 일으킬 수 있으나 저역통과필터와 적분이득을 조정하여 전압강하 보상기의 대역폭을 가상 임피던스에 비하여 낮게 설정하면 상호교란성분을 거의 제거할 수 있다. 식 (12)는 선로 임피던스의 불평형을 고려하여 일반적인 Q-V 수하제어기를 구현한 것이며 이 값은 출력전압제어기의 기준값으로 사용된다. 식 (13)은 전압강하 보상기가 포함된 새로운 출력전압기준을 나타내고 있으며 실제로 인버터가 추종하는 전압값을 나타낸다. 또한 그림 6과 같이 출력전압 기준값 V_{ref} 과 출력전압 V_c 그리고 임피던스 강하전압 V_{zs} 를 사용하여 식 (14)의 전압제어기를 구성할 수 있다.

$$V_r = V_m^* - k_q Q \quad (12)$$

$$V_{ref} = \left[\frac{k_i}{S} LPF(|V_r \sin \omega^* t| - |V_c|) + V_r \right] \sin \omega^* t \quad (13)$$

$$I_o^* = (k_{pv} + \frac{k_{iv}}{S})(V_{ref} - V_c - V_{zs}) \quad (14)$$

3.4 새로운 Wireless PLL 설계

기존의 Wireless 방식은 바이패스 주파수에 보다 항상 낮은 주파수로 운전되어 실제 UPS에 적용하기가 불가능하므로 본 연구에서는 바이패스 위상을 오차범위 내에서 추정하는 새로운 구조의 PLL을 적용하고자 한다. 기존의 주파수 수하제어에서는 유효전력의 보상성분을 그림 7의 K_2 루프를 통하여 주파수에 직접 보상하고 cos값의 변환이 K_2 루프이전에서 이루어지므로 PLL 출력 $\sin \theta^*$ 는 바이패스 전원의 주파수보다 낮은 값을 출력하여 위상비동기를 유발하므로 이런 PLL을 사용하는 UPS는 인버터 운전중에 바이패스로 절대 절체할 수 없는 구조가 된다.

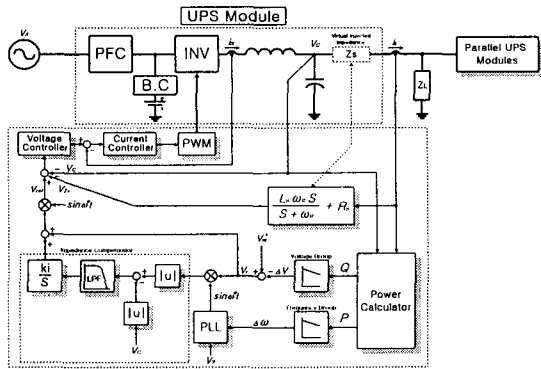


그림 6 새로운 Wireless 병렬제어 알고리즘 블록도
Fig. 6 Control block of novel wireless parallel algorithm

본 논문에서 제안하는 PLL은 바이패스 전원이 위상신호를 공급하는 상전모드와 위상신호가 없는 정전모드로 구분하여 이중 PLL 구조를 적용하였다. 상전모드에서 PLL은 식 (15)과 같이 주파수가 아닌 위상 수하제어를 수행하여 위상전이로 전력각을 제어한다. 제안한 PLL의 주파수는 항상 바이패스와 동일하고 미세한 위상편차만을 가지므로 바이패스로 절체가 가능해진다. 식 (16)는 정전모드를 나타내고 있으며 기본구조는 주파수 수하방식과 동일하다. 정전모드에서는 기준위상이 없으므로 각각의 UPS 모듈이 미리 설정된 주파수로 운전되며 모듈간의 주파수 편차는 적분기에 의해 자동적으로 보상되는 구조를 가진다. 이러한 동작은 상전 및 정전모드에 따라 K_1 과 K_2 의 이득을 조정함으로써 모드전환을 구현할 수 있다. 이와 같은 새로운 구조의 Wireless PLL을 적용하면 상전과 정전상태 모두 사용가능하며 인버터 사이에 위상신호를 주고받지 않아도 자동적으로 위상을 동기시킬 수 있다.

$$\sin \theta^* = \sin \left[\frac{1}{S} \left(k_{pp} + \frac{k_{ip}}{S} \right) \Delta \theta + k_1 P \right] = \sin (\omega_o t + \phi_p) \quad (15)$$

$$\sin \theta^* = \sin \left(\frac{\omega_{osc} + k_2 P}{S} \right) = \sin (\omega_o + \omega_p) t \quad (16)$$

4. 시뮬레이션 및 결과

본 논문에서 제안한 Wireless 병렬제어 알고리즘을 검증하기 위해 표 1과 같이 시스템 파라미터를 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 가상 임피던스는 정격용량에서 전압강하 1.5%를 기준으로 댐핑을 10%로 설정하였다. 필터 인덕터값의 편차를 5%로 설정하였고 인버터 불평형 이득보상을 위해 인버터 이득을 각각 0.32%와 0.16%의 오차를 고려하였다. 또한 정격무효전력에서 전압안정도 1.5%를 기준으로 Q-V 계수 k_q 와 정격유효전력에서 0.5°의 위상지연을 고려하여 P- ω 계수 k_p 를 설정하였다. 그림 8은 Wireless 병렬운전 알고리즘을 검증하기 위해 Matlab Simulink를 사용한 시뮬레이션 회로도를 보여주고 있다. 그림 9과 10은 시뮬레이션 파라미터에서

설정된 인버터 이득의 불평형을 보상하기 위해 오토튜닝 알고리즘을 수행하여 파라미터를 변경하는 과정을 나타내고 있다. 그림 4와 같이 오토튜닝 운전을 수행하면 전력편차와 순환전류는 0으로 수렴하는 것을 볼 수 있으며 그 결과로 그림 10과 같이 인버터 이득이 보상된 새로운 전압기준값을 추출할 수 있다. 그림 11은 각각의 UPS가 새로 갱신된 전압기준값을 가지고 정격부하운전을 수행하는 경우의 정상상태 인버터 출력전류를 나타낸다. 필터 인덕터와 인버터 이득의 오차를 보상했기 때문에 Wireless 방식으로 우수한 부하분담 성능을 얻을 수 있었다. 그림 12는 Wireless PLL 위상추종 성능을 보여주고 있으며 위상편차 초기값을 45°로 설정하고 PLL을 수행하였다. 그림 13은 과도상태에서 병렬인버터의 출력전류를 나타내고 있으며 부하분담 신호없이 정전과 복전상태에서 인버터의 투입과 절체가 원활하게 수행됨을 확인할 수 있다. 또한 과도상태에서 가상 임피던스가 순환전류를 효과적으로 차단하는 효과를 볼 수 있다. 그림 14는 가상 임피던스에 의한 전압강하를 보상하는 과정을 보여주고 있으며 과도상태에서 유효한 임피던스가 일정한 시정수 이후의 정상상태에서는 감소되는 추이를 보여준다.

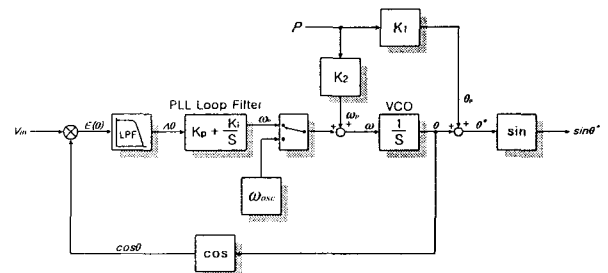


그림 7 새로운 Wireless PLL의 기본구조
Fig. 7 Structure of a novel wireless PLL

표 1 시뮬레이션 파라미터
Table 1 Simulation Parameter

항 목	설정값
모듈별 정격용량	5[kVA]
출력전압	220[V]
부하역률 (PF)	0.7
기본주파수의 가상 임피던스 값 (Z_s)	0.02+j0.15
가상 임피던스의 차단주파수 (ω_{cz})	$2\pi \cdot 200$ [rad]
인버터 입력 직류전압	400[V]
UPS1의 필터 인덕터 (L_{f1}/L_{f2})	0.6 / 0.63[mH]
필터 커패시터 (C_f)	50[μ F]
전압 Droop 계수	4/3000[V/VAR]
주파수 Droop 계수	1/20k[rad/W]
위상 Droop 계수	0.1/40k[rad · s/W]
UPS1의 라인 임피던스	0.03+j0.004
UPS1의 인버터 이득	311/312
UPS2의 인버터 이득	311/310.5

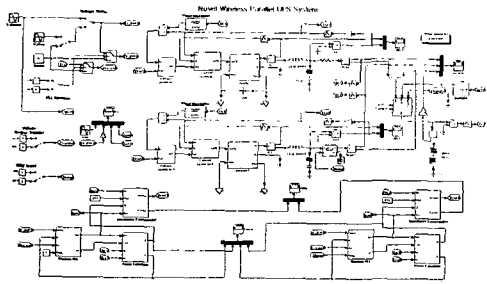


그림 8 Wireless 병렬운전 시뮬레이션 회로도
Fig. 8 Simulation schematic of wireless parallel operation

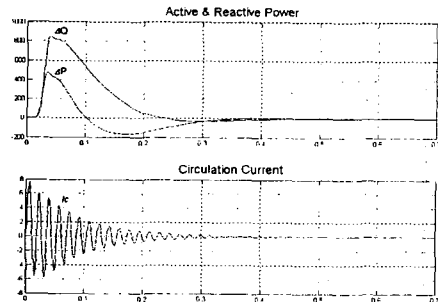


그림 9 Wireless 오토튜닝 동작시 전력편차와 순환전류
Fig. 9 Power deviation and circular current under auto-tuning operation

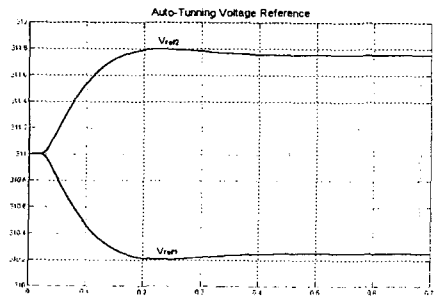


그림 10 Wireless 오토튜닝 동작시 전압기준값 보상특성
Fig. 10 Voltage reference under auto-tuning operation

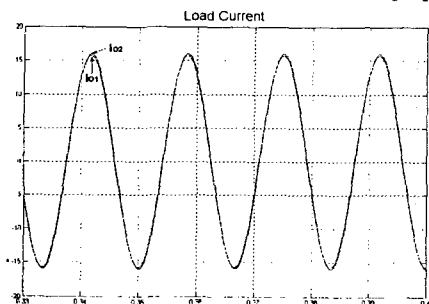


그림 11 정상상태의 인버터 출력전류
Fig. 11 Inverter current waveforms under steady state

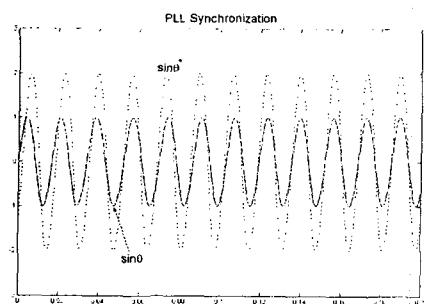


그림 12 PLL 위상동기화 운전
Fig. 12 PLL synchro operation

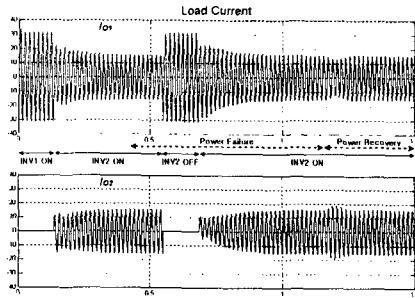


그림 13 과도상태의 인버터 출력전류
Fig. 13 Inverter current waveforms under transient state

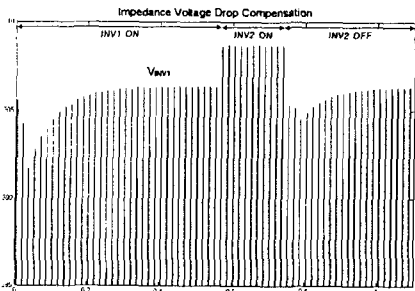


그림 14 가상 임피던스의 전압강하 보상파형
Fig. 14 Voltage drop compensation of virtual impedance

5. 결론

본 논문에서는 모듈형 인버터의 병렬운전제어를 위해 기존에 사용된 부하분담용 신호선을 제거하고 독립적인 운전을 수행하기 위해 새로운 형태의 제어알고리즘을 제안하였다. 본 논문에서 적용하는 제어기는 인버터간 불평형요소 제거알고리즘 적용하여 무효전력편차의 발생을 최소화하여 최적운전 조건을 추종하게 해준다. 또한 시스템의 불안정한 과도특성을 완충하는 가상의 임피던스를 삽입하여 과도순환전류를 저감하고 임피던스 전압강하 보상을 적용하여 정상상태전압을 안정화시켰다. 그리고 위상수하 PLL 알고리즘을 적용하여 유효전력편차의 보상과 정전 및 복전시 모드전환이 가능한 구조를 제안하였다. 이 모든 구조가 인버터 병렬운전의 고신뢰성을 보장할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

참고 문헌

- [1]Takao Kawabata, "Parallel Operation of Voltage Source Inverters," IEEE Trans. on Industrial Application, Vol. 24, No. 2, March, 1988, pp. 281-287.
- [2]Heinz van der Broeck, "A Simple Method for Parallel Operation of Inverters," Proceedings of the IEEE, 1999, pp. 143-150.
- [3]Anil Tuladhar, "Control of Parallel Inverters in Distributed AC Power Systems with Consideration of Line Impedance Effect," IEEE Trans. on Industrial Application, Vol. 36, No. 1, Jan, 2000, pp. 131-138.
- [4]S.J.Chiang, "A Multimodule Parallelable Series - Connected PWM Voltage Regulator," IEEE Trans. on Industrial electronics, Vol. 48, No. 3, June, 2001, pp. 506-516.