

평균전류 분담기법을 이용한 이중루프 전압제어기반 UPS 시스템의 병렬운전

백승훈, 구태근*, 조영훈
 건국대학교 전력전자연구실, 성신전기공업(주)*

An Average Current Sharing Strategy for Parallel Operation of UPS Systems with Dual-Loop Voltage Controller

Seunghoon Baek, Tae Geun Koo*, Younghoon Cho
 Power Electronics Lab., Konkuk Univ., Sungshin Electric Co. Ltd*

ABSTRACT

본 논문은 평균 전류 분담 기법을 적용한 UPS(Uninterruptible Power Supply) 시스템의 병렬 운전 기법을 제안한다. 각각의 UPS는 전류 정보를 공유하기 위하여 CAN 통신을 사용하며, 이중 루프 방식의 전압, 전류제어기로 구성되어 있다. UPS의 전류 분담 성능을 내부 전류 제어기의 피드백 전류인 인덕터 전류, 커패시터 전류 그리고 통신 시지연에 따라 영향을 분석하고 3상 30kVA급 UPS에 적용하여 그 유효성을 검증하였다.

1. 서론

UPS는 계통의 순간적인 또는 일정시간 지속되는 전원의 문제로부터 의료기관, 서버 및 대형 전산 장비 등 중요 부하에 대해 안정적이며 지속적인 고품질의 전력을 공급한다. 이러한 UPS 시스템은 지속적으로 증가하는 중요 부하를 고려하여 대응량화에 대한 수요가 증가하고 있다. 이에 UPS의 병렬 구성 방식은 용량 증설과 시스템의 안정성(Reliability)와 중복성(Redundancy) 확보에 용이하도록 개발되어 우수한 전압, 전류 품질을 가지는 안정적인 전원 공급이 가능하도록 하였다. 이와 같은 UPS 시스템의 병렬 구성과 제어 방법에 대하여 통신선 유무에 따라 나누어 살펴보면 아래와 같다.

첫 번째는 시스템 간에 통신선을 필요로 하지 않는 수하(Droop) 제어방법이 있다. 수하 제어방법은 통신선이 필요하지 않으므로 운전 간에 통신 문제로 인한 위험성이 없고 시스템 구성이 간편하다는 장점이 있다. 하지만 병렬 운전을 위한 부하분담 성능과 출력 전압의 품질 사이에는 트레이드 오프(Trade off)가 존재한다는 단점이 있다. 두 번째는 시스템 간에 통신선을 필요로 하는 방식 중 대표적으로 사용되는 주종(Master slave) 제어방법이 있다. 수하 제어방법에 비해 부하분담 성능이 우수하나 마스터(Master)에 고장이 발생하게 되면 안정적인 전압, 전류를 공급할 수 없다는 안정성과 중복성 문제가 있다. 이를 해결하기 위하여 주종 제어방법을 변형하여 마스터와 슬레이브(Slave)의 구분이 없는 평균전류 분담방식(Average Current Sharing), 환형 연결 제어(3C: Circular Chain Control)이 제안되었으나 시스템 간의 높은 통신 대역폭이 필요하고 인터페이스(Interface) 구성이 복잡해진다는 문제가 있다^{[1][2]}.

본 논문에서는 평균전류 분담방식에서 신뢰성 확보를 위해 전류 공유를 위한 별도의 중앙 제어 유닛(Unit)없이 UPS간의 전류 정보를 공유하는 방식을 제안한다. 또한 정보 공유시 통

신 시지연으로 인한 제어 안정도 해석을 통해 강건한 제어 시스템 구성 방안을 제안한다.

2. 시스템 구성

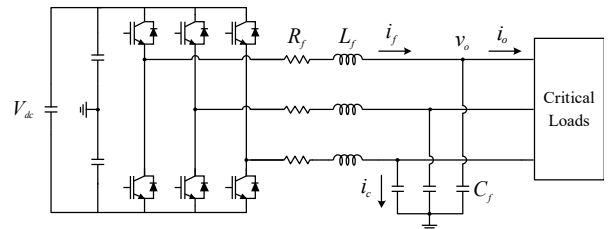


그림 1 3상 UPS 시스템 구성

Fig. 1 Three-phase UPS system with output LC filter

그림 1은 본 논문에서 다루는 3상 UPS 시스템으로 배터리 또는 계통에서 오는 전력을 입력받는 직류링크 전압 V_{dc} , 3상 인버터, 그리고 LC 필터로 구성되어 있다. 인덕터 전류 i_f , 커패시터 전류 i_c , 부하 전류 i_o 그리고 부하 전압 v_o 로 나타낼 수 있다.

2.1 이중루프 전압 제어기 구성

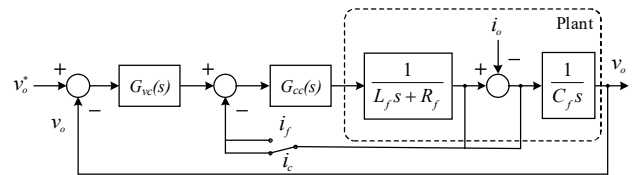


그림 2 이중루프 전압 제어기 구조

Fig. 2 Dual-loop voltage control scheme

그림 2는 전압과 전류 제어기가 각각 사용된 이중루프 구조의 단상 제어 블록도를 나타내며 내측 전류 제어기의 피드백 전류로는 인덕터 또는 커패시터 전류를 이용하여 구성이 가능하다.

이중루프 제어기는 직렬 구조로 인한 제어 시지연으로 넓은 대역폭을 가질 수 없다는 단점이 있으나 내부 전류 제어기로 인해 LC 필터의 공진을 성공적으로 저감시킬 수 있다는 장점이 있다. 또한 인덕터 전류를 피드백 전류로 이용하는 경우 하이브리드 ESS 또는 라인 인터랙티브 UPS와 같은 계통 연계형 인버터의 동작을 겸하는 응용분야에 적용이 용이하고 사고시 과전류를 보호하며 연속동작을 할 수 있다는 장점이 있다. 반면 커패시터 전류를 피드백 전류로 이용하는 경우 출력 임피던스가 낮으므로 부하전류에 의한 영향을 최소화할 수 있어 과도 특성과 비선형 부하에 대한 전압 제어 성능이 우수하다는 장점

이 있다. 부하 전압을 부하 전압 지령과 부하 전류에 대하여 페루프 전달함수로 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_o = G_d(s)v_o^*(s) - Z_d(s)i_o(s) \quad (1)$$

여기서 $G_d(s)$, $Z_c(s)$ 은 각각 페루프 전압 이득과 출력 임피던스를 나타내고 피드백 전류에 따라 다음 표 1과 같이 정리할 수 있다.

표 1 이중루프 전압 제어기의 페루프 전달함수

Table 1 Closed-loop transfer function of the dual-loop voltage controller

| $G_d(s)$ | $Z_c(s)$ | |
|---|--|----------------------------|
| i_f or i_c feedback | i_f feedback | i_c feedback |
| $\frac{G_{vc}(s)G_{cc}(s)}{P_{op}(s) + G_{vc}(s)G_{cc}(s)}$ | $\frac{G_{cc}(s) + L_f s + R_f}{T(s)}$ | $\frac{L_f s + R_f}{T(s)}$ |
| $T(s) = P_{op}(s) + G_{vc}(s)G_{cc}(s)$ $P_{op}(s) = L_f C_f s^2 + R_f C_f s + G_{cc}(s)C_f s + 1$ | | |

2.2 평균전류 분담기법을 이용한 병렬 운전

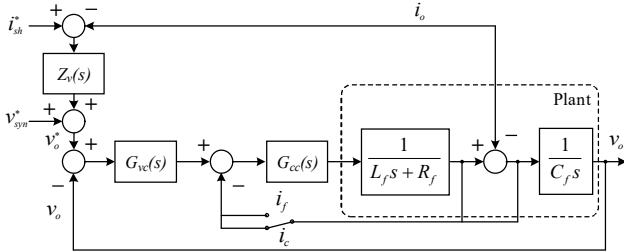


그림 3 평균전류 분담기법 제어기 구조

Fig. 3 Average current sharing control scheme

그림 3은 평균전류 분담기법의 블록도를 나타낸다. 병렬 운전을 위하여 각각의 UPS는 서로 부하 전류, PLL 동기 신호를 공유한다. 평균 전류 지령은 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있으며 여기서 통신 시지연은 $D(s)$ 로 나타낼 수 있다.

$$i_{sh}^* = \frac{1}{n}i_{o,1} + \frac{D(s)}{n} \sum_{i=2}^n i_{o,i} \quad (2)$$

$$D(s) = \frac{1 - 0.5T_d s}{1 + 0.5T_d s} \quad (3)$$

전류 공유를 위한 중앙 제어 유닛이 없으므로 제어하고자 하는 UPS의 해당 전류 지령은 통신 시지연이 나타나지 않는 특징이 있다. 케이블 임피던스 $Z_{cable}(s)$ 를 고려하여 부하 전류에 대하여 평균전류 분담기법의 페루프 전달함수를 정리하여 다음 식 (4)와 같다.

$$i_o = \frac{G_d(s)Z_v(s)D(s)}{Z_d(s) + Z_{cable}(s) + G_d(s)Z_v(s)} i_{avg}^* + \frac{G_d(s)}{Z_d(s) + Z_{cable}(s) + G_d(s)Z_v(s)} v_{syn}^* - \frac{1}{Z_d(s) + Z_{cable}(s) + G_d(s)Z_v(s)} v_{com}, \quad (n = \infty) \quad (4)$$

$$v_{com} = i_o Z_{cable} + v_o \quad (5)$$

여기서 확인할 수 있는 사항은 각 UPS의 제정수 차이로 인해 순환 전류가 발생한다는 것을 알 수 있고 또한 전류분담 이득 $Z(s)$ 을 통해 순환 전류를 저감시킬 수 있음을 확인할 수 있

다.

전류분담 기법의 안정도 해석을 위하여 개루프 이득을 구해보면 다음 식 (6)과 같다.

$$T_{sh}(s) = \frac{G_d(s)Z_v(s)D(s)}{Z_d(s) + Z_{cable}(s) + \frac{(n-1)G_d(s)Z_v(s)(1-D(s))}{n}} \quad (6)$$

표 2의 제정수를 이용하여 피드백 전류에 따른 주파수 응답을 구해보면 그림 4와 같다. 여기서 전압, 전류 제어기는 각각 공진, 비례 제어기로 구성하였다.

표 2 UPS 시스템 제정수

Table 2 Parameters of the UPS system

| | | | |
|-------|-------|---------------------|--------------|
| R_f | 0.01Ω | $T_d, D(s)$ | 2msec |
| L_f | 1.6mH | f_{sw} / f_{samp} | 7.5kHz/15kHz |
| C_f | 100μF | n | 2 |

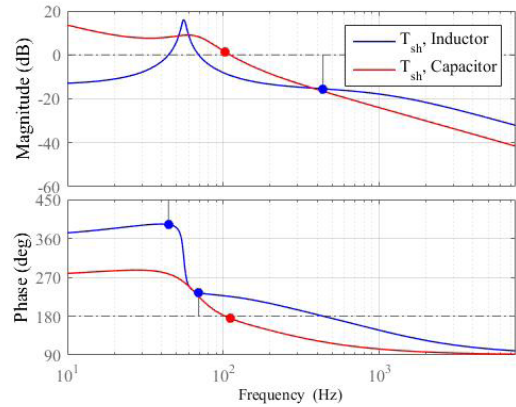


그림 4 전류분담 제어기의 보드선도

Fig. 4 Bode diagrams of the loop gain $T_{sh}(s)$

그림 4를 보면 커패시터 전류 피드백을 이용하는 경우 위상 여유를 확보하지 못해 불안정한 특성을 확인할 수 있다. 반면, 인덕터 전류 피드백을 이용하는 경우 충분한 이득여유와 위상 여유를 확보하여 안정적인 동작을 예상할 수 있다. 이러한 결과는 출력 임피던스의 차이로 인해 나타나게 되는데 낮은 출력 임피던스는 전류분담 개루프 전달함수에서 허수축에 가까운 극점으로 나타나고 이와 더불어 통신 시지연으로 인한 위상 지연이 발생하여 전체 시스템은 불안정한 특성으로 나타나게 된다. 반면, 인덕터 전류 피드백의 높은 출력 임피던스는 안정적인 병렬 운전 특성을 나타낼 수 있으나 전압 제어관점에서 과도 특성이나 비선형 부하에 대하여 출력 품질향상이 어렵다는 단점이 있다.

따라서, 통신 시지연으로 인한 전류분담 기법의 안정도 확보와 출력 임피던스의 최적화를 위하여 인덕터 전류 기반의 부하 전류 전향보상 방법을 적용하였다. 다음 식 (7)는 전향보상을 통한 출력 임피던스를 나타낸다. 여기서 k_{ff} 는 전향보상 이득을 나타낸다.

$$Z_d(s) = \frac{G_{cc}(s) + L_f s + R_f - k_{ff}}{T(s)} \quad (7)$$

또한 인덕터 전류의 사용으로 확보된 위상 여유를 이용하여 부하 전압 고조파 보상을 위한 5, 7차 공진제어기를 추가하였다. 이를 이용한 전류분담 개루프 이득은 그림 5와 같다.

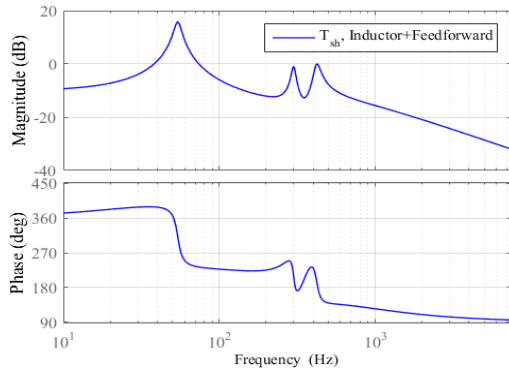


그림 5 전류분담 제어기의 보드선도, 부하전류 전향보상
Fig. 5 Bode diagrams of the loop gain $T_{sh}(s)$ with output current feedforward compensation

3. 시뮬레이션 및 실험 결과

3상 30kVA급 UPS 2대에 대하여 시뮬레이션과 실험을 진행하였으며 시스템 제정수는 표 2와 같다. 시뮬레이션은 PSIM을 이용하였으며 실험 구성은 다음 그림 6과 같다.

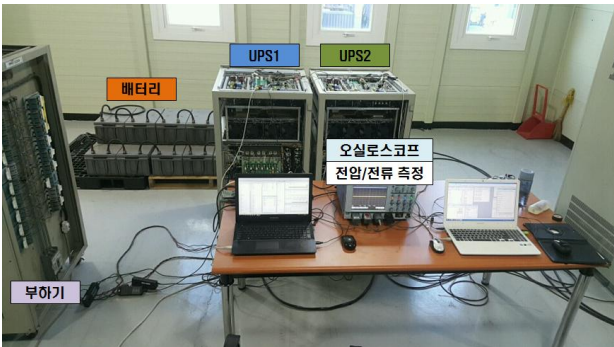


그림 6 실험 구성
Fig. 6 Experimental setup

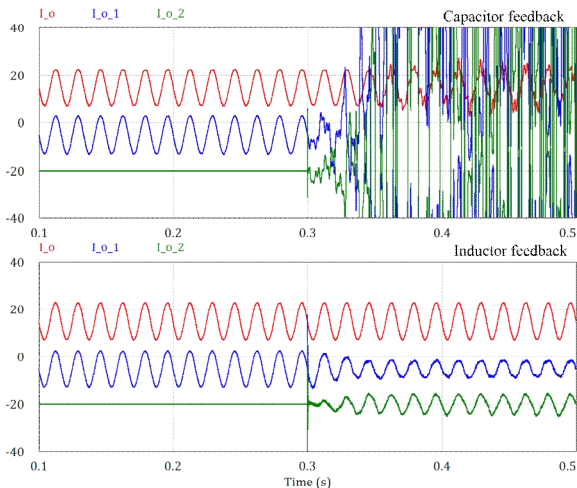
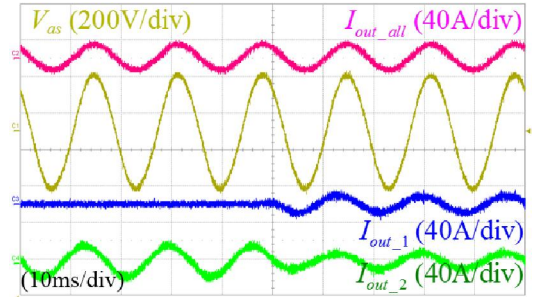
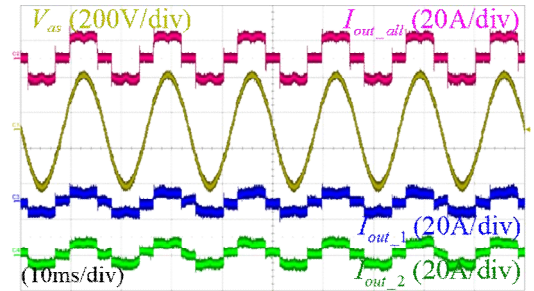


그림 7 피드백 전류에 따른 Hot-swap 시뮬레이션 결과
Fig. 7 Simulation results of hot-swap operation with inductor and capacitor current feedback

그림 7은 인덕터 또는 커패시터 전류 피드백을 이용하였을 경우 병렬 운전 시뮬레이션 파형을 나타낸다. 커패시터 전류 피드백을 이용하는 경우 병렬 운전 동작이 이루어지지 못하고 발산하는 것을 확인할 수 있다. 반면, 인덕터 전류 피드백을 이용하는 경우 앞서 안정도 해석과 같이 안정적인 동작을 확인할 수 있다.



(a)



(b)

그림 8 실험 구성

Fig. 8 Experimental results of (a) hot-swap and (b) nonlinear load

그림 8(a)는 선형 6.9kW 조건에서의 Hot swap 동작 실험 결과를 나타내고 그림 8(b)는 비선형 부하 13.2kW 조건에서의 병렬 운전 동작을 나타낸다. 그림 8(a)의 파형과 같이 병렬 운전 투입의 경우에도 큰 과도상태 없이 전류 분담과 전압 제어가 이루어지고 있음을 확인할 수 있다. 진술한 평균전류 분담 기법은 부하 분담률 5%이내, 비선형 부하 조건에서 전압 THD는 2.43%의 출력 성능을 나타낸다.

4. 결론

본 논문에서는 UPS 병렬 운전시 낮은 통신 대역폭과 중앙 제어 유닛으로 인한 UPS 병렬 시스템의 신뢰성과 안정성 문제를 개선하기 위해 전류 공유 방법과 전압 품질 향상 방안을 제안하고 분석하였다. 또한, 시뮬레이션과 실험을 통하여 제안된 UPS 병렬 시스템의 유효성을 검증하였다.

본 연구는 2017년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 에너지인력양성사업으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다. (No.20174030201660)

이 논문은 성신전기공업(주)의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] H. Han, X. Hou, J. Yang, J. Wu, M. Su and J. M. Guerrero, "Review of Power Sharing Control Strategies for Islanding Operation of AC Microgrids," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 1, pp. 200-215, Jan. 2016.
- [2] S. Tolani and P. Sensarma, "An Instantaneous Average Current Sharing Scheme for Parallel UPS Modules," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 12, pp. 9210-9220, Dec. 2017.