

# 병렬 멀티-모듈 UPS 인버터의 출력 LC필터를 이용한 예측제어

박정민, 이강현, 정원상, 박윤지, 원충연  
성균관대학교

## Predictive Control for Parallel Multi-module UPS Inverters with Output LC Filter

Jung Min Park, Kang Hyun Lee, Won Sang Jung, Yun Ji Park and Chung Yuen Won  
Sungkyunkwan University

### ABSTRACT

본 논문에서는 병렬 멀티 모듈 UPS 인버터의 출력 LC필터를 이용한 예측제어를 제안한다. 부하의 용량증가에 따라 단상 UPS 모듈을 병렬로 증가시켜 UPS 용량 증설하는 연구가 진행되고 있다. 이러한 UPS 시스템을 제어하기 위해 기존 제안 하였던 전류 예측 제어에서는 PI 전압 제어로 인해 UPS 모드 전환 시 제한된 동적 반응(Dynamic response)을 갖는 단점이 있었다. 이러한 문제점을 보완하기 위해, 본 논문에서는 PI 전압제어를 전압 예측 제어로 대체함으로써 보다 빠른 동적 반응을 가질 수 있는 전압 및 전류 예측제어를 제안한다. 제안한 제어기법의 타당성은 수학적 분석 및 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

### 1. 서론

UPS 시스템은 블랙 아웃(Black out) 또는 정전사고 발생 시 중요 부하(Critical loads)에 단시간에 전력을 공급하기 위해 사용된다[1]. 이러한 부하의 용량이 증가되면, UPS가 감당해야 하는 전력 용량 또한 증가해야 한다. 부하 증가에 따른 UPS 용량 증설에 용이하기 위해 직.병렬로 연결된 멀티 모듈 UPS 시스템이 제안되었으며, 이를 제어하기 위한 연구가 진행되고 있다. 기존에 제안하였던 전류 예측제어의 경우 그림 1과 같이 PI 전압 제어와 전류 예측 제어(Current predictive control)이 혼합된 구조를 가지며, 병렬 멀티 모듈 UPS 시스템의 빠른 동적 반응(Dynamic response)을 얻고자 제안하였다. 하지만 전압 PI제어는 낮은 동적 반응을 갖는 단점이 있으며, 이로 인해 제한된 동적 반응 향상을 가지게 되었다.

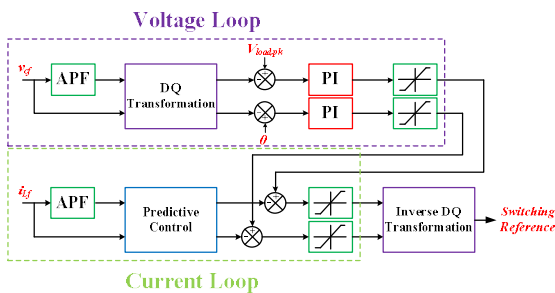


그림 1 기존 제안한 예측 제어  
Fig. 1. Previously proposed predictive control

본 논문에서는 이러한 단점을 보완하고자 전압 PI제어를 전압 예측 제어로 대체하는 전압 및 전류 예측제어를 제안한다. 전압 예측제어를 이용한 전압 제어 루프 구성을 위해, 변압기 2차 측에 연결된 출력 LC필터를 이용한 모델링이 수행된다. 이를 통해 기존 대비 더욱 향상된 동적 반응을 가져 UPS 모드 전환 시간을 감소시킬 수 있다. 제안한 제어기법의 타당성은 수학적 분석 및 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

### 2. 병렬 멀티-모듈 UPS 인버터

#### 2.1 UPS 인버터 구성

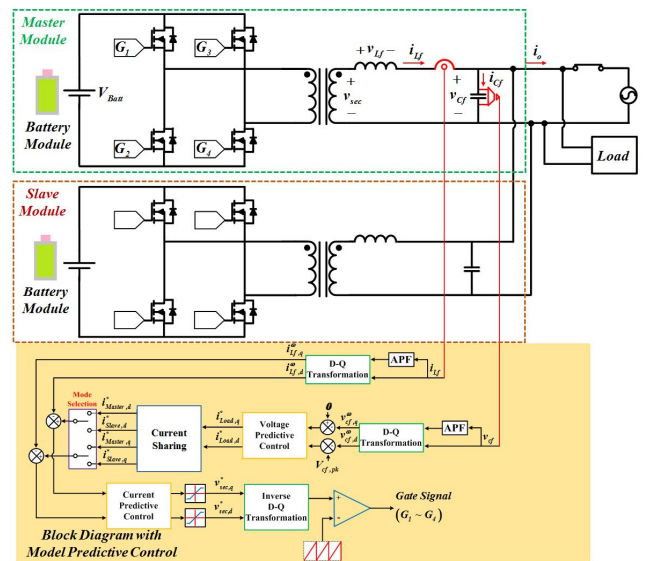


그림 2 병렬 멀티 모듈 UPS 인버터 구성  
Fig. 2. Configuration of Parallel Multi module UPS Inverters

제안하는 병렬 멀티 모듈 UPS 인버터의 구성 및 제어 블록도는 그림 2와 같다. 각각의 모듈은 모두 동일한 모듈로 구성되어 있음을 가정한다. 두 모듈은 마스터/슬레이브(Master/slave) 관계로 동작한다. 마스터 모듈에서는 UPS가 감당해야 하는 부하 전류  $i_{Load}$ 를 전압 예측제어로 계산하며, 전체 UPS 모듈의 개수로 나눈 전류 지령(Reference) 값  $i_{Master}$ ,  $i_{Slave}$ 를 해당 모듈로 전송한다. 즉, 마스터 모듈에서는 전압, 전류제어를 수행하며 슬레이브 모듈에서는 전류제어만을 수행한다.

## 2.1 출력 LC 필터의 이산 시간-상태 공간 모델

제안하는 예측 제어를 적용하기 위해, LC필터의 모델링이 수행된다. 본 논문에서는 LC필터의 전압 및 전류 방정식의 d q 레퍼런스 프레임(Reference frame) 통해 상대방정식을 얻을 수 있다. 이때 LC 수동소자의 ESR 성분은 매우 적다 가정되어 무시된다. 포워드 오일러 근사화(Forward Euler approximation)가 적용된 상대방정식은 식 (1)~(3)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \frac{i_{Lf,d}^{\omega}[k+1]-i_{Lf,d}^{\omega}[k]}{T} \\ \frac{i_{Lf,q}^{\omega}[k+1]-i_{Lf,q}^{\omega}[k]}{T} \\ \frac{v_{cf,d}^{\omega}[k+1]-v_{cf,d}^{\omega}[k]}{T} \\ \frac{v_{cf,q}^{\omega}[k+1]-v_{cf,q}^{\omega}[k]}{T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega & -\frac{1}{L_f} & 0 \\ -\omega & 0 & 0 & -\frac{1}{L_f} \\ \frac{1}{C_f} & 0 & 0 & \omega \\ 0 & \frac{1}{C_f} & -\omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Lf,d}^{\omega}[k] \\ i_{Lf,q}^{\omega}[k] \\ v_{cf,d}^{\omega}[k] \\ v_{cf,q}^{\omega}[k] \end{bmatrix} + \frac{1}{L_f} \begin{bmatrix} v_{sec,d}^{\omega}[k] \\ v_{sec,q}^{\omega}[k] \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \frac{1}{C_f} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ i_{o,d}^{\omega}[k] \\ i_{o,q}^{\omega}[k] \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$v_{cf}^{\omega}[k+1] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Lf,d}^{\omega}[k+1] \\ v_{cf,d}^{\omega}[k+1] \\ i_{Lf,q}^{\omega}[k+1] \\ v_{cf,q}^{\omega}[k+1] \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$i_{Lf}^{\omega}[k+1] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & j & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Lf,d}^{\omega}[k+1] \\ v_{cf,d}^{\omega}[k+1] \\ i_{Lf,q}^{\omega}[k+1] \\ v_{cf,q}^{\omega}[k+1] \end{bmatrix} \quad (3)$$

### 2.1.1 비용 함수

전압 루프의 비용 함수(Cost function)는 지령 값과 측정 값의 차로 구성된다. 또한 본 논문에서 제안하는 비용 함수는 k+1번째에서 0이 되도록 지령 값을 산출한다. 이는 식 (4),(5)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 d는 유효성분, q는 무효성분을 나타낸다.

$$g_d^{\omega}[k] = v_{cf,d}^{\omega}[k+1] - v_{cf,d}^{\omega}[k] \quad (4)$$

$$g_q^{\omega}[k] = v_{cf,q}^{\omega}[k+1] - v_{cf,q}^{\omega}[k] \quad (5)$$

식 (1), (2)를 이용한 제안하는 전압 루프 구성을 위한 비용 함수는 아래의 식과 같다.

$$i_{Lf,d}^{\omega}[k] = \frac{C_f}{T} (311 - v_{cf,d}^{\omega}[k]) + i_{o,d}^{\omega}[k] - C_f \omega v_{cf,q}^{\omega}[k] \quad (6)$$

$$i_{Lf,q}^{\omega}[k] = \frac{C_f}{T} (0 - v_{cf,q}^{\omega}[k]) + C_f \omega v_{cf,d}^{\omega}[k] + i_{o,q}^{\omega}[k] \quad (7)$$

전류 제어 루프의 비용함수 또한 전압 제어 루프와 유사하게 구성된다. 식 (1), (3)을 이용하여 전류 제어 루프 구성을 위한 비용함수는 식 (8), (9)와 같다.

$$v_{sec,d}^{\omega}[k] = \frac{L_f}{T} (i_{Lf,d}^{\omega}[k] - i_{Lf,d}^{\omega}[k]) + v_{cf,d}^{\omega}[k] - \omega L_f i_{Lf,q}^{\omega}[k] \quad (8)$$

$$v_{sec,q}^{\omega}[k] = \frac{L_f}{T} (i_{Lf,q}^{\omega}[k] - i_{Lf,q}^{\omega}[k]) + v_{cf,q}^{\omega}[k] + \omega L_f i_{Lf,d}^{\omega}[k] \quad (9)$$

## 3. 시뮬레이션

제안하는 제어 기법의 타당성을 확인하기 위해, PSIM 소프트웨어를 이용하여 기존 제어와 본 논문에서 제안하는 제어의 우수성을 확인하였다.

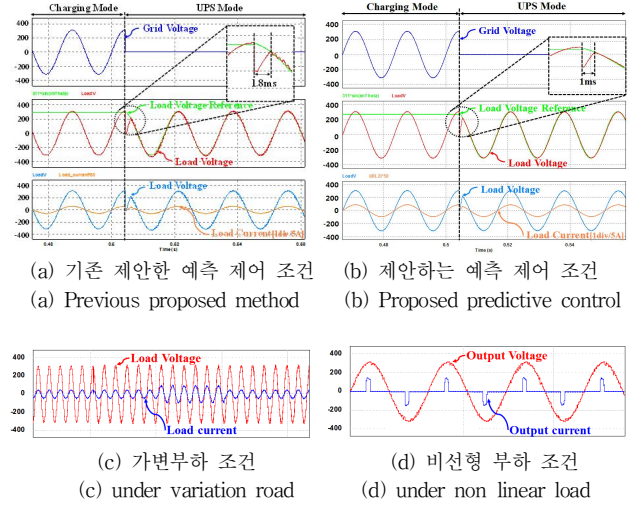


그림 3. 시뮬레이션 결과

Fig. 3. Simulation results

그림 3의 (a) 및 (b)는 각각 기존에 제안한 제어기법을 적용한 시뮬레이션 결과와 본 논문에서 제안하는 예측 제어를 적용한 결과 파형이다. 기존 제어기법의 경우 모드절환 시 약 1.8ms의 시간이 소요된 반면, 제안하는 예측제어의 경우 약 1ms의 빠른 모드절환 시간을 나타내어 약 1.8배 빠른 동적 반응을 나타냈다.

제안하는 예측제어의 강인성을 확인하기 위한 시뮬레이션 결과는 그림 3의 (c) 및 (d)와 같다. 가변 부하 및 비선형 부하(정류기 부하)조건을 가정하여 시뮬레이션이 수행되었으며, 두 부하 조건에서도 안정적인 전압 및 전류제어를 확인하였다.

## 4. 결론

본 논문에서는 병렬 멀티 모듈 UPS인버터의 빠른 동적 반응을 얻기 위해 출력 LC 필터를 이용한 예측제어를 제안하였다. PI 제어가 갖는 낮은 동적 반응을 보완하고자, 출력 LC 필터의 모델링을 통해 비용함수를 결정한 후, 이를 전압 및 전류 제어 루프에 적용하였다. 제안한 예측제어의 타당성은 2개의 UPS 모듈을 이용한 시뮬레이션을 통해 기존 전류 예측 제어와 비교하여 타당성을 검증하였다.

## 참고 문헌

[1] Y. Hu, L. Chang, B. Cao, and Y. Tagawa, "Novel predictive voltage controlled UPS inverter for an improved stand alone wind turbine system," Electrical and Computer Engineering, 2009. CCECE '09. Canadian Conference on , pp.398-402, May, 2009. S. M. Mueen, J. Tamura, and T. Murata, Stability Augmentation of Grid connected Wind Farm, Springer Verlag London, October 2009.