

계통 연계 단상 인버터의 양방향 모드 전환을 위한 동기 회전 좌표계에서의 개선된 제어 기법

이강주, 김범준, 금호중, 원충연
성균관대학교

Improved Control Method for Seamless Mode Transfer of Grid Connected Single-Phase Inverter in Synchronous Rotating Frame

Kang Joo Lee, Bum Jun Kim, Ho Jung Kum, Chung Yuen Won
Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문에서는 계통 연계 단상 인버터의 양방향 모드 전환을 위한 새로운 제어 기법을 제안하였다. 일반적으로 DC 측과 AC 측 사이의 전력 흐름은 d q 동기 회전 좌표계에서 계통 연계 인버터의 전류 지령치에 의해 제어된다. 따라서 전력 흐름의 방향이 변경되면 전류 지령치를 반전하는 것이 일반적이다. 그러나 전류의 급격한 변화를 초래하고 과도상태가 길어지는 등 AC 측의 전력 품질을 악화시킨다. 따라서 본 논문에서는 동기 회전 좌표계에서의 원활한 모드 전환을 위한 향상된 제어 기법을 제안한다. 이론적 분석과 시뮬레이션 결과로 제안된 제어 기법의 타당성을 입증한다.

1. 서론

단상 풀 브리지 인버터는 무정전 전원 공급장치(UPS), 배터리 리튬저장장치(BESS) 등에서 주로 사용되는 전력변환장치이다. 이 인버터를 계통과 연계하기 위해서는 계통인 AC측과 DC측 사이에 출력전압을 안정적으로 만들고 부하 변동이나 비선형 부하에 대한 우수한 응답특성, 계통 연계 운전 및 단독 운전 능력이 요구된다. 이때 이 단상 인버터를 계통과 연결하여 양방향 전력변환장치로 사용하는 계통 연계 모드에서 에너지 전달 방향이 반전 될 경우 전류 스파이크 등의 문제가 발생하게 된다.^[1] 그러므로 본 논문에서는 계통 연계 모드에서 DC/AC 양방향 충·방전 동작 시 양방향 모드 전환을 위한 동기 회전 좌표계에서의 개선된 d q 동작점 제어 기법을 제안한다.

2. 본론

2.1 시스템 구성

본 논문은 그림1과 같은 계통과 연계하여 사용하는 단상 인버터 토폴로지를 사용한다. 이 인버터를 계통 연계 모드에서 양방향으로 전력을 교환하려면 전류 지령치를 d q 동기 회전 좌표계에서의 동작점을 바꿔줌으로써 제어해야 한다. APF(All Pass Filter)를 통해 계통 전압의 위상 θ 와 정지좌표계에서의 계통 전류값을 얻고 이 θ 와 계통전류를 일치 혹은 반전되도록 지령치를 제어함으로써 충·방전 동작으로의 양방향 모드 전환을 수행하게 된다.

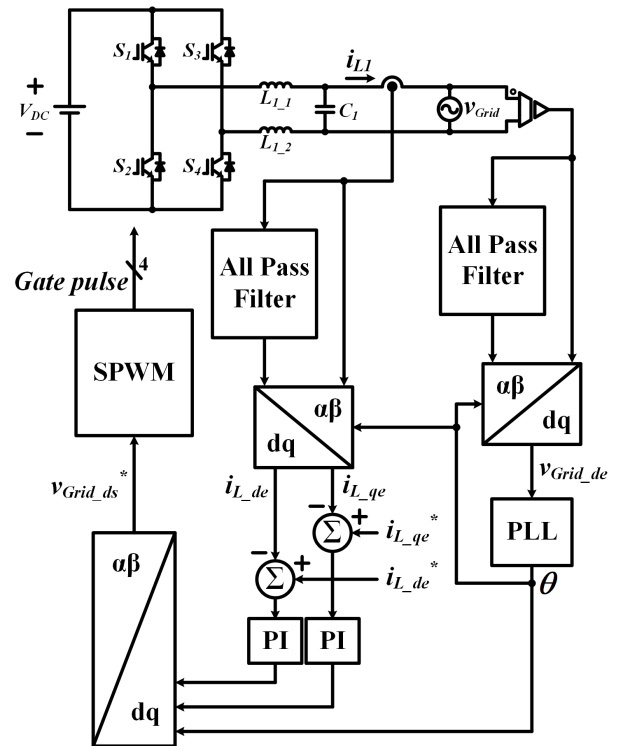


그림 1 계통 연계 단상 인버터의 회로도 및 제어 블록도
Fig. 1 Circuit and control block diagram of grid connected Single-phase inverter

2.2 기존의 양방향 전력 흐름 제어 방법

식1과 같이 계통 전압을 sin파로 기준 할 때 기존의 제어 방법은 램프 함수와 같이 제어기의 지령치인 식2를 급변 시켜 수행한다. 식2의 전류값이 I_{max} 와 $-I_{max}$ 로 전류가 급변하며 모드를 전환하면 계통인 AC측의 전력 품질을 악화시키는 등 많은 문제를 야기하므로 이 문제를 해결하기 위해 안정적으로 전류를 반전시키는 제어 방법이 필요하게 된다.

$$\begin{bmatrix} V_{dc} \\ V_{qe} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{max}\sin\theta \\ -V_{max}\cos\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -V_{max} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} I_{de} \\ I_{qe} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{max}\sin\theta \\ -I_{max}\cos\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -I_{max} \end{bmatrix} \quad (2)$$

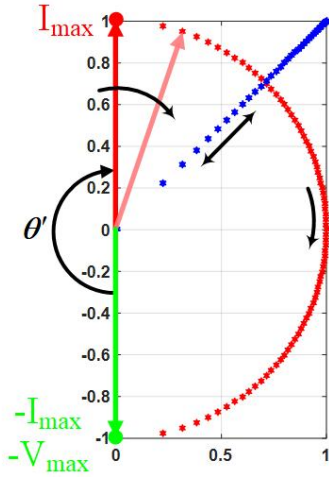


그림 2 우반면에서의 d-q 동작점 제어 개념도
Fig. 2 d-q point to operate control concept map in RHP (Right Half Plane)

2.3 제안하는 양방향 전력 흐름 제어 기법

전류센서 방향을 고려하여 충전모드인 \sin 의 전류라 가정할 때 전류의 동작점은 그림2에서의 I_{max} 이다. 이때 방전으로 모드전환 시 기존 제어 기법은 I_{max} 에서 $-I_{max}$ 로 급변시키며 제어를 하므로 많은 문제가 발생한다. 문제 해결을 위해 제안하는 제어 기법은 크기는 유지시킨 채 위상만을 이동시켜 동기 회전 좌표계에서 d q 동작점을 제어하는 방법이다. 충전모드 시 전압과 전류의 위상차 θ' 이 180° 이므로 그림2의 I_{max} 에서 시작하며 이때 V_{max} 와의 위상차가 증가하는 방향인 우반면(RHP)에서 전류의 d축값은 파란색 점선의 지령치를 따라 점차 이동시켜 증감하며 q축값은 붉은색 점선의 지령치를 따라 제어하는 방법이다. 이와 같이 제안하는 방법을 통하여 제어하게 되면 전류의 급변을 막고 크기는 유지시키므로 안정적인 계통 연계 모드에서 양방향의 모드전환을 가능하게 한다.

$$\begin{bmatrix} V_{dc} \\ V_{qe} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{max}\sin\theta \\ -V_{max}\cos\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -V_{max} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I_{de} \\ I_{qe} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{max}\sin(\theta+\theta') \\ -I_{max}\cos(\theta+\theta') \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} I_{max}\cos\theta\sin(\theta+\theta') - I_{max}\sin\theta\cos(\theta+\theta') \\ -I_{max}\sin\theta\sin(\theta+\theta') - I_{max}\cos\theta\cos(\theta+\theta') \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} I_{max}\sin\theta' \\ -I_{max}\cos\theta' \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

2.4 시뮬레이션 결과

다음 표1과 같은 파라미터를 그림1의 토폴로지에 적용하여 PSIM을 통해 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 그림3과 같은 파형이 출력되었다. 붉은 파형은 전압과의 위상차가 증가하는 방향인 우반면(RHP)을 통한 제어이며 푸른 파형은 위상차가 감소하는 방향인 좌반면(LHP)을 통한 d q 동작점 제어로 전류

급변 없이 안정적으로 모드를 전환하는 것을 검증하였다.

표 1 시뮬레이션 파라미터
Table 1 Simulation parameter

Parameter	Values	Unit
Rated Power	6.6	[kW]
Grid Voltage	220	[Vrms]
Grid Frequency	60	[Hz]
Switching Frequency	20	[kHz]
DC side Voltage	400	[V]
Filter	Inductance	2 [mH]
	Capacitance	40 [μ F]

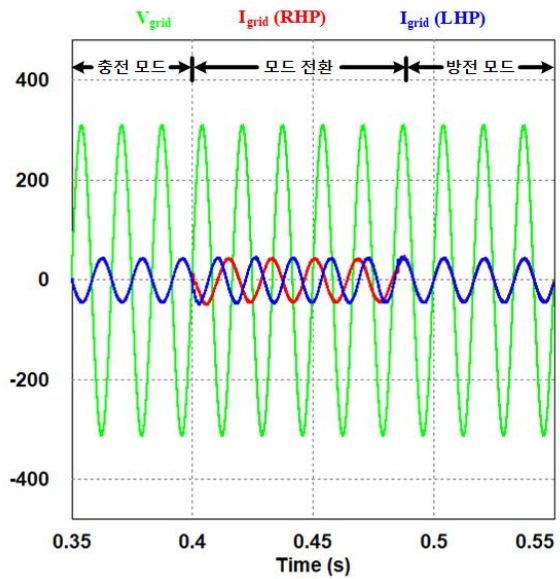


그림 3 모드전환 시 시뮬레이션 파형
Fig. 3 Simulation waveform at mode transfer

3. 결론

본 논문에서는 계통 연계 단상 인버터에서 d q 동작점을 제어함으로써 양방향 모드의 모드 전환이 안정적으로 이루어지도록 하는 제어 기법을 제안하였다. d q 동작점을 동기 회전 좌표계에서 제어함으로써 전류의 크기는 유지하고 위상만을 이동시키는 기법에 대하여 분석 및 수학적으로 도출하였다. PSIM을 통한 시뮬레이션으로 모드 전환 시 계통 측 전류의 크기는 유지하며 위상만을 이동시켜 동작점을 제어함으로써 모드 전환이 안정적으로 수행하는 것을 검증하였다.

참고 문헌

[1] C. R. Baier, M. Torres, J. A. Muñoz, R. A. Marco, E. N. Eduardo and P. Acuña, "Bidirectional power flow control of a single phase current source grid tie battery energy storage system," 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Buzios,