

## DQ 모델을 이용한 단상 계통연계 인버터의 제어

최시영, 김래영, 권형남, 송종환  
(주)효성중공업연구소 기초팀

### The Control of Single Phase Inverter System Using DQ Modeling

S.Y. Choi, R.Y. Kim, H.N. Kwon, and J.W. Song  
R&D Institute, Industrial Performance Group, Hyosung Corp.

#### ABSTRACT

분산전원용 계통연계 인버터가 효율적인 분산전원으로 사용되기 위해서는 기존 계통과 협조 운전이 필요하다. 따라서 전류제어 외에 무효전력의 제어, 계통과 연계시의 PLL 제어, 단독운전 방지 제어 등의 다양한 기능이 필요하다. 그러나 단상 시스템의 경우, 3상 시스템과 달리 교류전력을 다뤄야 하므로, 제어 시 위상 지연이 발생하게 되고 무효전력을 제어하기 어려운 문제점들이 발생된다.

따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 dq 모델을 단상시스템에 적용하여 단상 제어의 문제점을 보완하였다.

#### 1. 서론

3상 시스템의 조류제어나 전동기의 제어에서 동기좌표계 모델이 사용되어진다<sup>[1][2]</sup>. 그 이유는 동기좌표계 모델이 갖는 장점들 때문인데, 동기좌표계 모델은 아래의 장점들을 갖는다. 첫째로 동기좌표계 모델은 3상 시스템의 순시 모델이다. 따라서 시스템의 순시 제어가 가능하다. 두 번째로 동기좌표계 모델의 값은 직류 값이므로 제어 및 필터링 과정에서 장점을 가진다. 또한 동기좌표계 모델에서는 어떤 변수를 직교하는 두 가지 성분으로 분리가 가능하다. 이것은 유·무효전력의 제어를 용이하게 한다. 그러나 현재의 동기좌표계 모델링 기법은 단상시스템에는 적용할 수 없으므로 계통연계 인버터와 같이 다양한 제어 및 보호기능이 필요한 시스템에서 많은 어려움이 따른다<sup>[3]</sup>. 따라서 단상시스템에서도 동기좌표계를 적용한다면 단상 시스템의 단점을 극복할 수 있고, 또한 3상 시스템에서 사용되어지는 다양한 알고리즘을 이용할 수 있다. 본 논문에서는 단상 시스템에서도 동기좌표계 모델을 적용할 수 있는 이론을 제시하였으며, APF(All Pass

Filter)를 사용한 단상시스템의 제어방법을 제시하였다. 그리고 시뮬레이션을 통해 그 타당성을 검증하였다.

#### 2. 단상시스템에서의 DQ 변환

전력시스템의 해석을 위해 일반적으로 페이저를 사용한다. 페이저 변환은 다음과 같은 방법으로 구현된다. 전압을 식(1)과 같이 정의할 때,

$$v = V \cdot \cos(\omega t + \phi) \quad (1)$$

(1)

페이저 변환을 위해 식(1)을 식(1)과 90° 지연된 허수부를 갖는 복소수로 변환시켜 식(2)를 만든다.

$$v = V_{rms} \cdot \{ \cos(\omega t + \phi) + j \sin(\omega t + \phi) \} \quad (2)$$

식(2)는 그림 1(a)에서처럼 복소평면에서 반시계방향으로  $\omega t$ 의 속도로 회전하는 벡터로 표현된다. 이것을 입력하는 하는 LTI system (Linear Time Invariant system)의 출력이 식(3)과 같다고 할 때,

$$v' = V'_{rms} \cdot \{ \cos(\omega t + \phi') + j \sin(\omega t + \phi') \} \quad (3)$$

실수부의 입력은 실수부의 출력으로만 나오고, 허수부의 입력은 허수부의 출력으로만 나오게 된다. 이런 이유로 식(4)가 성립하고,

$$v' = \text{Re}(v') \quad (4)$$

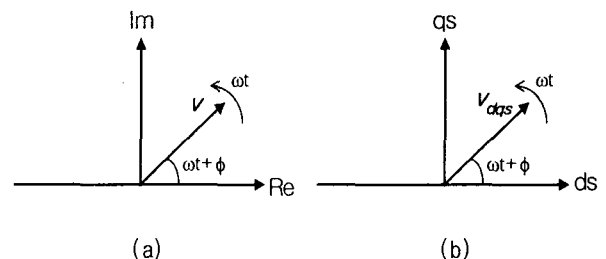


그림 1 복소평면(a)과 dq축(b)에서의 회전벡터  
Fig. 1 The rotating vector in complex plane(a) and in dq frame(b)

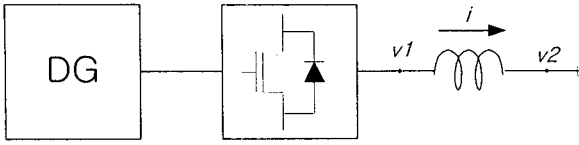


그림 2 계통연계 인버터 시스템  
Fig. 2 A inverter system tied with utility

이것은 식(1)을 입력으로 LTI system의 출력을 구한 값과, 식(2)를 입력으로 얻은 출력값에서 실수부만을 취한 값은 서로 같음을 의미한다. 이것이 시스템을 페이저로 모델링할 수 있는 타당성을 제공한다. 식(1)의 페이저변환인 식(5)는 식(3)에서 주파수 부분을 제거하고 실효치와 위상만으로 표현된다.

$$\mathbf{V} = V_{rms} \{ \cos(\phi) + j \sin(\phi) \} \quad (5)$$

전류도 위와 같은 과정으로 페이저 변환을 하면 평균 유효전력과 무효전력은 각각 식(6)과 식(7)로 표현된다.  $Re()$ 와  $Im()$ 은 각각 실수부와 허수부를 의미한다.

$$P_{avg} = Re(\mathbf{V}\mathbf{I}^*) \quad (6)$$

$$Q_{avg} = Im(\mathbf{V}\mathbf{I}^*) \quad (7)$$

식(1)을 동기좌표계변환을 하기 위하여 우선 식(2)를 정지좌표계에서 표현하면 식(8)과 같고, 그림 1(b)와 같이 반시계방향으로  $\omega t$ 의 속도로 회전하는 벡터로 표현된다.

$$\mathbf{v}_{dqs} = \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \cos(\omega t + \phi) \\ V \sin(\omega t + \phi) \end{bmatrix} \quad (8)$$

식(2)와 식(8)은 식(2)는 실효치로, 식(8)은 최대치로 표현된 점과 좌표계가 다를 뿐 같은 표현이므로 식(8)을 입력으로 하는 LTI system의 출력을 식(9)라 하면

$$\mathbf{v}'_{dqs} = \begin{bmatrix} v'_{ds} \\ v'_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V' \cos(\omega t + \phi') \\ V' \sin(\omega t + \phi') \end{bmatrix} \quad (9)$$

식(4)와 같은 논리로 식(10)이 성립한다.

$$\mathbf{v}' = v'_{ds} \quad (10)$$

식(10)은 식(1)을 입력으로 LTI system의 출력을 구한 값과 식(8)을 입력으로 얻은 출력의 d축 성분만을 취한 값은 서로 같음을 의미한다. 이것은 페이저 변환일 경우와 마찬가지로 단상시스템의 정지좌표계 모델링의 타당성을 제공한다.

식(8)의 동기좌표계 변환은 3상 시스템과 같은 방법으로 구현될 수 있다. 어떤 벡터를  $\omega t$  회전시키는 벡터를 식(11)과 같이 정의할 때,

$$\mathbf{R}(\omega t) = \begin{bmatrix} \cos \omega t & -\sin \omega t \\ \sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \quad (11)$$

동기좌표계변환은 식(12)와 같다.

$$\mathbf{v}_{dqe} = \begin{bmatrix} v_{de} \\ v_{qe} \end{bmatrix} = \mathbf{R}(-\omega t) \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기에서 주목할 점은 식(1)의 페이저 변환 값인 식(5)와 동기좌표계 변환 값인 식(12)는 서로 같은 값이라는 점이다. 따라서 동기좌표계 변환은 페이저 변환을 순시적으로 구현하는 수단으로 이해될 수 있다.

단상과 3상의 동기좌표계변환의 차이점은 3상변환의 경우 정지좌표계변환을 통해  $v_{qs}$  성분을 순시적으로 구할 수 있다는 점이다. 즉, 3상변환에서 정지좌표계변환은 a상 값의  $90^\circ$  지연된 값을 구하는 과정으로도 이해되어 질 수 있다. 이를 통해 3상변환은 기본과 성분뿐만 아니라, 역상분을 포함하여 다양한 주파수 성분의 정보를 포함하게 된다. 그러나 단상에서는  $v_{qs}$ 를 순시적으로 구할 수 없으며  $v_{qs}$ 를 구하기 위한 별도의 과정이 필요하다. 동기좌표계에서 평균 유·무효전력은 각각 식(13)과 식(14)로 표현된다.

$$P_{avg} = \frac{1}{2} (v_{de} i_{de} + v_{qe} i_{qe}) \quad (13)$$

$$Q_{avg} = \frac{1}{2} (v_{qe} i_{de} - v_{de} i_{qe}) \quad (14)$$

3상 시스템에서는 순시 유·무효전력과 평균 유·무효전력은 같은 값이나, 단상 시스템에서는 서로 다른 값이 되고, 동기좌표계에서 구현된 값은 평균 유·무효전력에 해당된다.

### 3. 계통연계 인버터의 DQ모델 및 제어

그림 2의 계통연계 인버터의 단상 동기좌표계 모델은 3상 시스템 경우와 같은 방법으로 구현된다. 정지좌표계에서 d축과 q축에 대하여 구현된 상태방정식은 식(15)와 같다.

$$\frac{d\mathbf{i}_{dqs}}{dt} = \frac{1}{L} (\mathbf{v}_{1dqs} - \mathbf{v}_{2dqs}) \quad (15)$$

식(15)는 식(16)처럼 동기좌표계값으로 변환될 수 있다.

$$\frac{d(\mathbf{R}(\omega t) \mathbf{i}_{dqe})}{dt} = \frac{1}{L} \mathbf{R}(\omega t) (\mathbf{v}_{1dqe} - \mathbf{v}_{2dqe}) \quad (16)$$

식(16)을 정리하면 식(17)과 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{de} \\ i_{qe} \end{bmatrix} = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_{1de} \\ v_{1qe} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} i_q \\ -i_d \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_{2de} \\ v_{2qe} \end{bmatrix} \quad (17)$$

식(17)은 3상 시스템에서 구현된 식과 동일함을 알 수 있다. 그림 3은 동기좌표계에서 구현된 시스템 모델과 제어과정을 나타낸 블록도이다. 동기좌표계

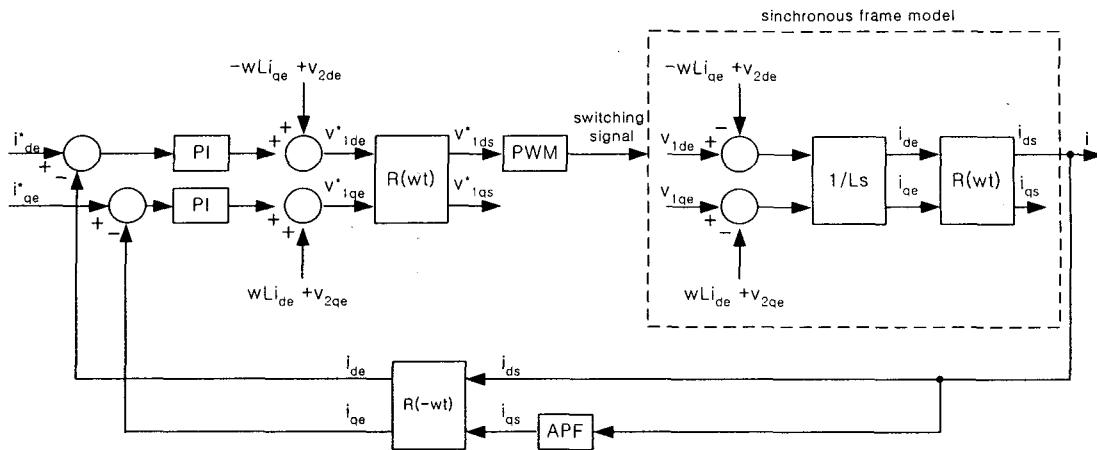


그림 3 동기좌표계에서 구현된 시스템 모델과 제어 블록도  
 Fig. 3 A system model realized in synchronous frame and control block of the system

로의 변환을 위해서, 검출된  $i_{ds}$ 로부터  $i_{ds}$ 보다  $90^\circ$  지연된 값인  $i_{qs}$ 를 구하는 과정이 필요하다. 이를 위해 본 논문에서는 이득은 1이고 위상만  $90^\circ$  지연시켜주는 APF(All Pass Filter)를 사용하였다.  $i_{ds}$ 와  $i_{qs}$ 는 동기좌표계로 변환되어 제어기를 거친다. 이 제어기의 출력값인 전압지령치는 PWM을 수행하기 위해 정지좌표계로 역 변환된다. 이 정지좌표계 값 중 q축 성분은 동기좌표계로 변환하기 위해 필요한 성분으로 물리적인 의미는 없다. 따라서 d축 성분만을 취하여 PWM을 수행하게 된다.

#### 4. 시뮬레이션 결과

그림 4는 유·무효전력의 지령치가 변할 때 실제의 인버터 출력이 그 지령치를 추종하는 것을 보여주는 파형이다. 0.2초 이전까지는 유효전력은 600W, 무효전력은 0으로 제어를 하고 있다. 0.2초에서 유효전력의 지령치를 스텝으로 1200W로 변화를 주었고, 무효전력의 지령치는 0으로 유지시켰다. 이때 실제 유효전력은 반주기 이내에서 추종함을 알 수 있다. 무효전력은 약간의 요동이 있지만 0으로 유지되고 있음을 보여준다. 0.3초에서 유효전력의 지령치는 그대로 유지시키고 무효전력의 지령치만 스텝으로 600Var 만큼 변화를 주었고, 그림 4는 출력되는 전력 중 무효전력성분만 지령치에 따라 변하는 것을 보여준다. 따라서 그림 4로부터, 동기좌표계에서 단상 시스템을 제어함으로써, 유·무효전력을 각각 독립적으로 제어할 수 있음을 알 수 있다. 그림 5는 유·무효전력의 지령치가 변하는 순간의 인버터 출력전류를 확대하여 보여주고 있다. 그림 5(a)는 0.2초에서 유효전력의 지령치만 변

하였으므로 역률은 1로 유지하면서 출력전류의 크기만 변하고 있다. 그림 5(b)는 0.3초에 무효전력의 지령치가 변했으므로 크기 뿐만 아니라 위상도 변함을 알 수 있다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 동기좌표계 변환은 순시적으로 패이저를 구현하는 수단이라는 것을 이론적으로 보였고, 따라서 단상시스템에도 동기좌표계변환이 적용될 수 있음을 보였다. 또한 시뮬레이션을 통해 동기좌표계에서 유·무효전력이 각각 독립적으로 제어될 수 있음을 보였다.

단상 시스템의 동기좌표계 모델은 3상 시스템의 모델과 같은 형태를 가진다.

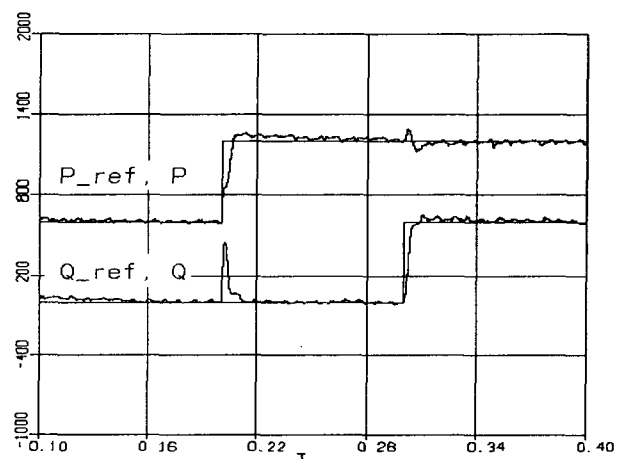
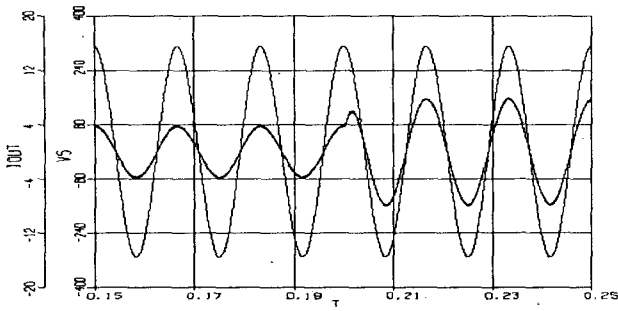
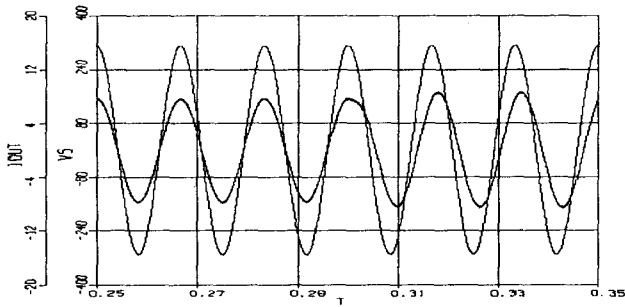


그림 4 유·무효전력의 지령치가 변함에 따른 실제 출력파형  
 Fig. 4 Inverter output power according to step power reference



(a)



(b)

그림 5 인버터 출력 전류 파형 (a) 0.2초에서 유효전력 지령치가 600W에서 1200W로 변할 때 (b) 0.3초에서 무효전력 지령치가 0에서 600Var로 변할 때

Fig. 5 Inverter output current (a) active power reference is changed to 1200W from 600W (b) reactive power reference  $i_c$  changed to 600Var from 0

따라서 유·무효전력의 제어뿐만 아니라 PLL 등 3상 시스템에 적용되는 알고리즘을 그대로 단상 시스템에 적용할 수 있는 장점을 가진다. 본 논문에서는 계통연계 인버터에 이 알고리즘을 적용시켰지만, 단상 시스템을 분석하고 제어하는 모든 시스템에 적용될 수 있다. 또한 본 논문에서 제시한 방법은 단상시스템을 순시적으로 동기좌표계로 변환하는 방법이므로 임의의 다상 시스템에 대해서도 단상의 동기좌표계 해석이 가능함을 의미한다.

### 참고 문헌

- [1] S. Bhattacharya and D.M. Drivan, "Synchronous frame based controller implementation for a hybrid series active filter system," *IEEE IAS Ann. Mtg.*, pp.2531-2540, 1995.
- [2] Alexandre Campos, Geza Joos, "Analysis and Design of a Series Voltage Unbalanced Compensator Based on a Three-Phase VSI Operating With Unbalanced Switching Function," *IEEE Trans, Power Elec. vol.9, no.3*, pp.269-274, May 1994.
- [3] George A. O'Sullivan, Fuel Cell, Inverters for Utility Application, IEEE PESC2000, pp. 1191\_1194, 2000.