

계통연계형 인버터의 강인한 직접적응 전류제어 기법에 관한 연구

김태원, 박태준, 한무호
포항산업과학연구원(RIST)

Robust Direct Adaptive Current Controller for Grid-connection Inverter

Tae-Won Kim, Tae-Joon Park, Mu-Ho Han
Research Institute of Industrial Science & Technology(RIST)

ABSTRACT

본 논문은 계통연계형 인버터의 정현파 전류제어를 위한 직접 적응제어 기법을 제안한다. 기존의 계통연계형 인버터 전류제어기에 비해 고조파 성분 제거 능력이 우수하고 소프트웨어적으로 쉽게 구현할 수 있는 장점이 있다. LC필터의 L값의 변동에 의한 제어기 내부의 파라미터가 발산하는 문제를 Resetting기법을 적용하여 보완하였다. 본 논문에서 제안한 정현파 전류 적응제어기의 우수성을 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다.

1. 서론

계통연계형 분산전원 시스템의 보급이 확대되고 있으며 실제 분산전원의 요소기술 중 전력변환장치는 발전전력의 고품질화, 시스템의 안정화 및 고효율화 그리고 전력품질 및 신뢰도 향상에 결정적 역할을 수행한다. 특히 전력의 품질을 향상시키기 위해서 계통연계형 인버터는 낮은 THD를 만족시키기 위해 정현파 전류제어를 감당해야 한다. 국내 한전 가이드라인 및 국제규격(IEEE1547, UL1741등)에서는 계통연계 전류의 THD에 대해 엄격한 기준을 정하고 있다. 전류 THD의 총합이 5% 미만이어야 하고, 각 차수에 대해서도 3% 미만을 만족해야 한다. 본 저자는 단상 계통연계형 인버터 시스템에 있어서 모델추종 적응제어기법을 이용한 정현파 전류제어 알고리즘을 제안하였다.^[1] 그러나, 실제 적용에 있어서 필터 L 값의 변동이나 센서 측정 노이즈 등으로 인해 제어 파라미터가 발산하는 문제가 발생하였다. 본 논문에서는 이러한 제어기 내부 파라미터가 발산하는 문제를 해결하기 위한 방법으로 Resetting기법을 적용하였고 타당성을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

2. 제안된 전류제어기

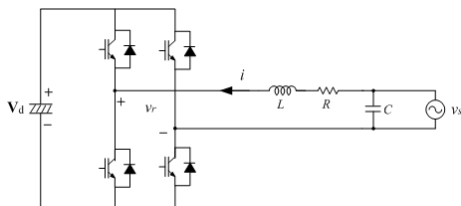


그림 1 계통연계형 단상 인버터 구성도

그림1의 인버터의 출력필터 인덕터 L의 양단에 대해 미분방정식을 구해보면 다음의 1차 System형태로 표현할 수 있다.

$$\text{Plant} : \dot{i} = -\frac{R}{L}i + \frac{1}{L}u \quad \text{식(1)}$$

$$\text{Model} : i_m = I \sin \omega t \quad \text{식(2)}$$

여기서 입력 $u = v_s - v_r$ 이고 v_s 는 한 스위칭 주기의 계통 평균전압을 나타내고 있고, v_r 은 한 스위칭 주기 동안의 인버터 평균 출력전압으로 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$v_r = \text{duty} * Vd \quad \text{식(3)}$$

여기서 duty는 한 스위칭 주기 안에서의 PWM 파형의 시비율을 나타내고, Vd 는 DC link 양단 평균전압을 의미한다. 위 식에서 Plant의 전류 i 가 정현파 모델전류인 i_m 를 추종하도록 제어입력 u 를 구하는 것이 목적이고 이를 위해 모델추종 적응제어기를 구성하고자 한다. Plant의 전류 i 와 모델전류 i_m 의 차이를 error신호 $e = i - i_m$ 로 정의하면 e 의 미분치는 다음식과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{e} = \dot{i} - \dot{i}_m = -\frac{R}{L}e - \frac{R}{L}i_m - \dot{i}_m + \frac{1}{L}u \quad \text{식(4)}$$

여기서 제어입력 $u = -k_1e - k_2i_m - k_3\dot{i}_m$ ($k_1 = La - R$, $k_2 = -R$, $k_3 = -L$, a 는 임의의 양수)으로 잡으면 식(4)는 다음과 같이 된다.

$$\dot{e} = -\frac{R}{L}e - \frac{R}{L}i_m - \dot{i}_m + \frac{1}{L}(-k_1e - k_2i_m - k_3\dot{i}_m) = -ae \quad \text{식(5)}$$

그런데, 제어 파라미터 k_1, k_2, k_3 는 unknown이므로 control law를 estimated value로 치환해서 구성하면 다음식과 같다.

$$u = -\hat{k}_1e - \hat{k}_2i_m - \hat{k}_3\dot{i}_m \quad \text{식(6)}$$

error신호 e 의 미분은 series-parallel 모델을 적용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[2]

$$\begin{aligned} \dot{e} &= -ae + \frac{1}{L}(-\hat{k}_1e - \hat{k}_2i_m - \hat{k}_3\dot{i}_m) - \frac{1}{L}(-k_1e - k_2i_m - k_3\dot{i}_m) \\ &= -ae - \frac{1}{L}(\tilde{k}_1e + \tilde{k}_2i_m + \tilde{k}_3\dot{i}_m) \end{aligned} \quad \text{식(7)}$$

여기서 Lyapunov 함수 $V = \frac{1}{2}e^2 + \frac{\tilde{k}_1^2}{2\gamma_1} + \frac{\tilde{k}_2^2}{2\gamma_2} + \frac{\tilde{k}_3^2}{2\gamma_3}$ 를 정의하고 시간에 대해 미분을 하면 다음식과 같다.

$$\dot{V} = e\dot{e} + \frac{\tilde{k}_1\dot{\tilde{k}}_1}{\gamma_1} + \frac{\tilde{k}_2\dot{\tilde{k}}_2}{\gamma_2} + \frac{\tilde{k}_3\dot{\tilde{k}}_3}{\gamma_3} \quad \text{식(8)}$$

식(8)에 식(7)을 대입하면 다음식과 같이 표현된다.

$$\dot{V} = -ae^2 + \frac{\tilde{k}_1}{\gamma_1}(\dot{\tilde{k}}_1 - \gamma_1 e^2) + \frac{\tilde{k}_2}{\gamma_2}(\dot{\tilde{k}}_2 - \gamma_2 e i_m) + \frac{\tilde{k}_3}{\gamma_3}(\dot{\tilde{k}}_3 - \gamma_3 e i_m) \quad \text{식 (9)}$$

따라서 Control update law를 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{k}}_1 &= \dot{k}_1 = \gamma_1 e^2 \\ \dot{\tilde{k}}_2 &= \dot{k}_2 = \gamma_2 e i_m \end{aligned} \quad \text{식 (10)}$$

$$\dot{\tilde{k}}_3 = \dot{k}_3 = \gamma_3 e i_m$$

식(10)을 식(9)에 대입하면 $\dot{V} = -ae^2 \leq 0$ 이 되고, 따라서 error e는 시간 t가 증가함에 따라 0으로 수렴한다. 상기 제어 알고리즘을 블록다이어그램으로 표현하면 그림2와 같이 된다. 여기서 k_1 값에 e의 제곱항이 있어 발산의 우려가 있다. 본 논문에서는 k_1 의 크기가 일정값 이상으로 올라가면 Resetting을 통해 $k_1 - \Delta$ 로 크기를 제한시키는 방법을 제안한다. Resetting후에도 인버터 출력전류에 왜란이 발생하지 않음을 시뮬레이션을 통해 확인 할 수 있었다.

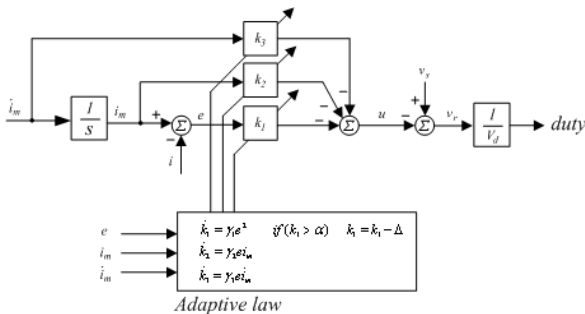


그림 2 제안된 직접적응제어 알고리즘 블록다이어그램

3. 시뮬레이션 결과

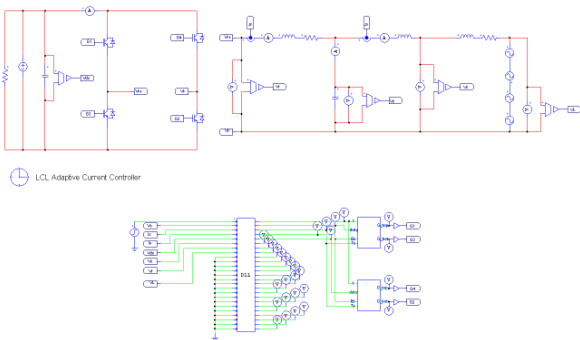


그림 3 제안된 인버터 전류제어 시스템의 PSIM 모델

본 논문에서 제안된 모델추종 적응제어 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 PSIM tool을 이용해서 시뮬레이션을 수행하였다. 그림4는 제안하는 계통연계 인버터 전류제어기의 과도상태 응답특성을 나타낸 것이다. Lypunov stability에 의해 모델전류와 계통전류의 error값인 e는 시간이 지남에 따라 0으로 수렴하고 제어 파라미터인 k_1, k_2, k_3 는 일정한 값으로 bounded 되어서 수렴하는 것을 볼 수 있다.

그림5는 왜곡된 전원전압 하에서의 제안된 전류제어기의 응답특성과 성능을 나타낸 것이다. 전원전압의 고조파는 다음과

같이 $v_s = 300 \sin \omega + 30 \sin 5\omega + 20 \sin 6\omega + 10 \sin 7\omega$ 설정 하였다. 제어 파라미터 중에 k_2, k_3 는 일정한 값으로 수렴하고 있고, k_1 은 일정값 이상으로 올라가면 resetting 시켜서 발산을 방지시킨다. 왜곡된 전원전압 하에서도 안정적인 성능을 나타내고 있고, 정현과 전류제어가 이루어 지고 있음을 볼 수 있다.

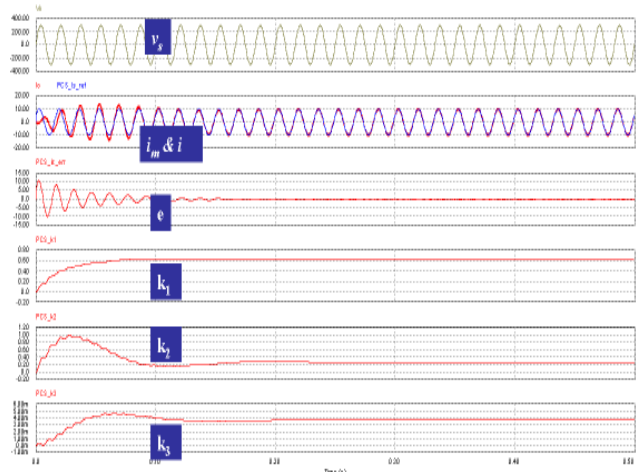


그림 4 제안된 적응제어기의 과도상태 시뮬레이션 파형

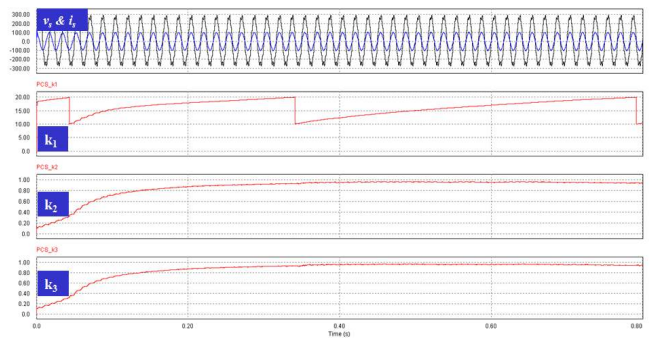


그림 5 왜곡된 전원전압 하에서 제안된 제어기의 특성 파형

4. 결론

본 논문은 계통연계형 인버터의 정현과 전류제어를 위한 직접 적응제어 기법을 제안한다. 기존의 계통연계형 인버터 전류제어기에 비해 고조파 성분 제거 능력이 우수하고 소프트웨어적으로 쉽게 구현할 수 있는 장점이 있다. LC필터의 L값의 변동에 의한 제어기 내부의 파라미터가 발산하는 문제를 Resetting기법을 적용하여 보완하였다. 본 논문에서 제안한 정현과 전류 적응제어기의 우수성을 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다.

참고 문헌

- [1] 박태준, 김태원, 이성희, 이진희, 한무호, 이왕하, "계통연계형 인버터의 모델추종 적응제어 전류기법에 관한 연구", 전력전자학술대회 논문집, pp.36-38, 2009.
- [2] P.A.Ioannou, J.Sun, "Robust Adaptive Control", Prentice Hall.