

배전계통 전압왜곡 하에서의 연계인버터 전류제어기의 최적조정

안중보, 황기현, 박준호

한국전기연구원 전력연구단, 동서대학교 인터넷공학부, 부산대학교 전기공학과

Optimum Tuning of Current Controller for Grid-connected Inverter under the Distorted Voltage Condition in Distribution System

Jong-Bo Ahn, Ki-Hyun Hwang, June-Ho Park

Korea Electrotechnology Research Institute, Dongseo University, Pusan National University

ABSTRACT

본 논문은 신·재생에너지를 이용한 분산전원용 계통연계 인버터의 전류고조파저감에 관한 연구로서 전류고조파는 전력품질 측면에서 중요한 요소 중의 하나이나 전원전압의 불평형, 왜곡 및 부적절한 전류제어기의 조정 등의 원인으로 인하여 이런 목적의 달성이 어렵게 된다. 전류제어기법 중에는 동기좌표계 상에서 동작하는 전향보상부 PI 제어기가 일반적으로 사용되고 있으며 본 논문에서는 전원전압 왜곡 하에서 전류제어기 이득과 전류고조파의 관계를 분석하고 Particle Swarm Optimization (PSO) 알고리즘을 이용하여 PI 제어기를 최적 조정하는 방법을 제안하였으며 모의시험과 적용실험을 통하여 그 유용성을 입증하였다.

1. 서 론

풍력, 태양광, 연료전지 등 신·재생에너지를 이용한 분산전원은 전압형 인버터를 통하여 전력계통에 연계되며 내부에 전류제어루프를 이용하여 출력 전력을 제어하고 있다. 전류제어기법으로는 히스테리시스전류제어, 예측전류제어 등 다양한 기법들이 연구되었지만 그 유용성이나 구현의 용이성으로 인하여 동기좌표 비례-적분제어기 형태가 가장 일반적으로 사용되고 있다^[1]. 계통연계형 인버터의 전력품질 측면의 요구사항들은 IEEE Std. 519-1992와 IEEE Std. 1547에 나타난 것과 같이 전류 종합고조파왜형율(total harmonic distortion, THD)이 일정 수준 이하로 유지되도록 규정하고 있다. 그러나 전류제어기의 불완전한 이득 조정이나 약한 배전망에서의 전원전압의 왜곡 등의 원인으로 인해 인버터 출력 전류에 심한 왜곡현상이 발생하게 된다. 따라서 계통연계형 인버터의 출력전

류의 고조파 성분을 최소화하는 방법 중에서 기존의 동기좌표 비례-적분 제어기의 적절한 이득조정에 의해 이러한 문제점을 해결하는 방안이 제안되었다^[2]. 그러나 이득조정은 여전히 시행착오법에 의존해야 하는 문제를 안고 있다.

비례-적분형 제어기의 자동조정에 관한 여러 기법들, 예로 시행착오법, 지글러-니콜스법(Ziegler-Nichols), 내부모델제어법(internal model control, IMC)이 소개되었고 유전알고리즘, 퍼지시스템 등 인공지능을 이용한 기법들도 연구되고 있다^[4-7]. 본 논문에서는 새로운 진화연산의 알고리즘인 PSO(particle swarm optimization)기법을 적용하여 온라인으로 전류제어기를 조정하며 계통연계 인버터의 규정을 만족하기 위한 목적함수를 제안하였다. 제안된 전류제어기 조정 알고리즘은 모의실험과 실험을 통하여 그 유용성을 입증하였다. 한편 모의실험에서는 과도 및 정상상태 특성을 크게 희생하지 않고 짧은 시간에 인버터의 특성을 모의할 수 있는 평균스위칭모델(average switching model, ASM)을 적용하였다^[1, 8].

2. 본 론

2.1 수학적 모델

계통연계형 인버터의 구성은 아래의 그림 1과 같으며, 그림 2와 같은 동기좌표계에서의 전압방정식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} E_{de} &= L_s \frac{di_{de}}{dt} - \omega L_s i_{qe} + V_{de} \\ E_{qe} &= L_s \frac{di_{qe}}{dt} + \omega L_s i_{de} + V_{qe} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, E_{de} , E_{qe} : 각각 전원의 d축, q축 전압

V_{de} , V_{qe} : 각각 인버터의 d축, q축 출력전압

인버터의 출력전압은 전류제어기에 의해 결정되며 식 (1)의 우변 첫째항인 리액터강하분에 미분항

을 포함하고 있으므로 이 값 대신에 비례-적분기를 추가하여 아래의 식 (2)와 같이 사용하게 된다.

$$V_{de}^* = E_{de} + \omega L_s i_{qe}^* + u_{cd}$$

$$V_{qe}^* = E_{qe} - \omega L_s i_{de}^* + u_{cq}$$
(2)

여기서, u_{cd} , u_{cq} 는 각각 d축, q축 비례-적분형 전류제어기의 출력이며 식으로 나타내면 아래의 식 (3)과 같다.

$$u_{cd} = (K_p + \frac{K_i}{s})(i_{de}^* - i_{de})$$

$$u_{cq} = (K_p + \frac{K_i}{s})(i_{qe}^* - i_{qe})$$
(3)

여기서 i_{de}^* , i_{qe}^* 는 각각 d축, q축 전류기준이며 통상 역률 1로 운전하기 때문에 $i_{de}^* = 0$ 로 하게 된다.

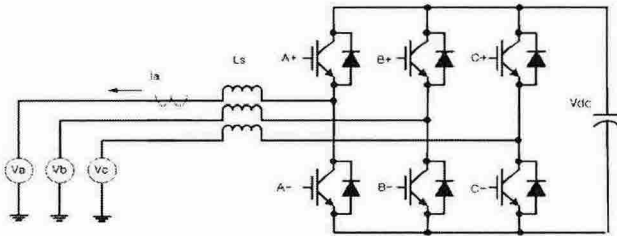


그림 1 계통연계형 인버터의 모델
Fig. 1 Model of grid-connected inverter

2.2 전류제어기의 전원전압 왜곡 영향 분석

전원전압에 고조파가 낮은 수준으로 포함된 경우에 정상상태의 전류 파형은 미리 조정된 전류제어기의 이득으로는 상당한 수준의 왜곡이 나타날 수 있음이 지적되고 있다^[2]. 먼저 전원전압에 고조파가 함유된 경우에 전류제어기의 이득과 출력 전류의 고조파 함유량과의 관계를 규명해 보기로 한다. 이를 위해서 ASM 모델을 이용하여 전원전압에 5차 고조파가 2[%] 포함된 경우에 연계인버터의 출력 전압을 모의한 결과가 그림 2에 나타나 있다. 그림 2의 (a)에서 보는 것처럼 이득이 충분히 크지 않을 경우 전원전압의 낮은 왜곡에 대해서 출력 전류의 THD는 9.2[%]에 이르게 되고 이는 IEEE Std. 1547에 규정한 5[%]를 크게 초과하는 결과를 가져오게 된다. 그림 2의 (b)는 전류제어기의 비례 이득을 5배 증가하였을 때의 전류파형을 보여주고 있으며 이 경우 THD는 2.4[%]로 크게 감소했음을 볼 수 있다. 이와 같이 전류제어기의 비례이득이 증가하면 출력전류의 THD를 낮출 수 있으나 실제에 있어서 제어기의 적절한 이득 조정 문제가 발생하게 된다.

2.3 전원전압 왜곡 하에서의 전류제어기 최적 조정

본 논문에서는 전원전압의 왜곡에 기인하는 전류제어기의 성능저하문제를 해결하기 위한 방법으로서 PI형 전류제

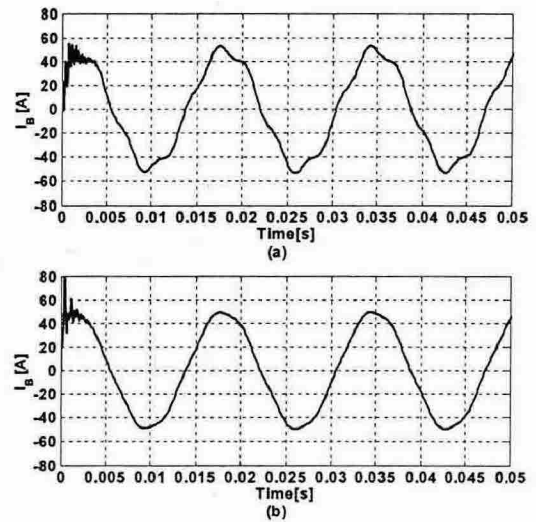


그림 2 전류제어기 비례이득과 전류 파형
(a) 낮은 비례이득(THD=9.2%), (b) 5배의 비례 이득(THD=2.4%)
Fig. 2 Current waveform at different gains
(a) Low K_p (THD=9.2%), (b) $5 \cdot K_p$ (THD=2.4%)

어기 이득의 최적화를 통한 방법을 채택하고자 한다.

PI 제어기의 조정은 기존의 다양한 방법들이 제안되었고 특히 유전알고리즘은 복잡한 최적화 문제를 해결하는데 성공적으로 적용되어 왔으나 최근의 연구 결과들은 최적화될 파라미터들이 상호관련 되어있는 응용에서는 탐색능력의 악화가 뚜렷하고 특히 조기 수렴문제가 있는 것이 지적되고 있다^[2,3]. PSO는 다른 확률적인 탐색기법보다 연산시간이 단축되면서도 안정적인 수렴 특성을 보여 주며 연속영역의 비선형 최적화 문제를 안정적으로 해결해주는 것으로 평가되므로 전류제어기의 조정에 이를 적용하고자 한다^[2,3].

아래의 그림 3은 PSO와 ASM 모델을 이용한 연계인버터의 전류제어기 이득 조정 블록도가 나타나 있다.

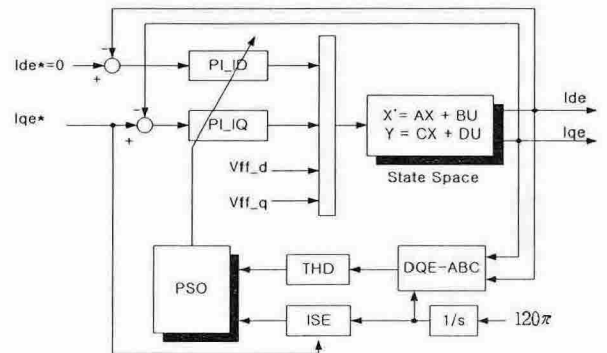


그림 3 PSO를 이용한 전류제어기의 조정(ASM 모델)
Fig. 3 Tuning of current controller using PSO(ASM model)

2.3 실험 결과

본 논문에서는 국제적인 연계표준 등에서 규정되어 있는 고조파 함유율을 포함한 목적함수를 적용하였다. 특히 이 목적함수는 정상상태의 고조파왜형율과 과도상태

를 포함하는 ISE를 결합하였으므로 연계 인버터의 조정 용으로 최적의 목적함수라 할 수 있다. PI 전류제어기의 이득을 조정하기 위한 목적함수로 식 (4)과 같다.

$$f = k_1 \cdot THD + k_2 \cdot ISE \quad (4)$$

여기서, k_1 , k_2 는 가중치이다. 모의실험 및 실험에 사용된 파라미터는 표1과 같다.

표 1 시스템 파라미터
Table 1 System parameter

전원전압 (V_{LL})	220[V]
인버터 용량(P)	5[kW]
인덕턴스(L1)	1[mH]
인덕턴스(L2)	100[μ H]
스위칭 주파수	10[kHz]
캐패시턴스(Cf)	15[μ F]
직류전압(Vdc)	500[V]

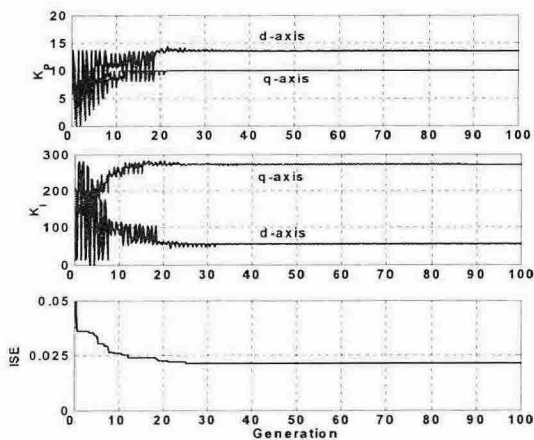


그림 4 이득의 조정 과정(상:Kp, 중: Ki, 하 : ISE)
Fig. 4 Gain tuning process
(top: Kp, middle: Ki, bottom: ISE)

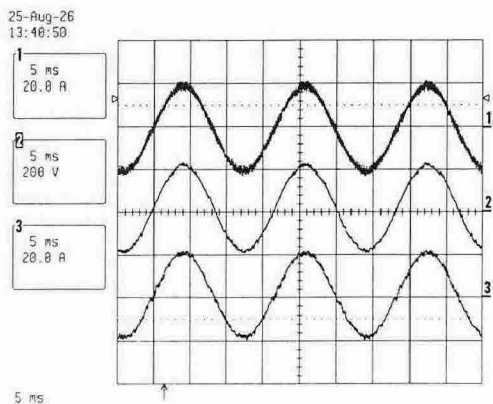


그림 5 전원전압과 필터전류
(1-인버터 전류, 2-전원전압, 3-전원전류)
Fig. 5 Source voltage and filter current
(1-inverter current, 2-source voltage, 3-source current)

그림 4에는 PI 전류제어기의 조정과정이 나타나 있으며 세대 수의 증가에 따라 이득이 증가함을 볼 수 있다. 그림 5에는 조정된 전류제어기의 정상상태 파형이 나타나 있다.

3. 결론

본 논문에서는 PSO의 전역적, 국부적 탐색능력을 PI 제어기의 최적 조정용으로 사용하여 전류제어기의 파라미터들을 조정하였으며 정상상태와 과도상태 특성을 동시에 고려하기 위해서 전류의 종합고조파왜형율(THD)과 오차자승적분(ISE)을 결합한 목적함수를 제안하였다. 모의시험과 실험을 통하여 제안된 기법이 기존의 예측제어기법이나 지글러-니콜스법 같은 기존 방법으로 조정된 PI 제어기에 비해 응답성이나 전류고조파 측면에서 우수한 특성을 보임을 입증하였다. 제안한 방법은 계통연계 인버터의 전류제어기에 있어서 온라인으로 전력 품질과 응답성 측면에서 정량적 조정이 가능함을 보였으며 다른 고성능제어기나 4-래그 인버터 토폴로지에의 적용 등이 향후의 연구 과제로 남겨져 있다.

참고 문헌

- [1] T. M. Rowan and R. J. Kerkman, "A new synchronous current regulator and an analysis of a current-regulated PWM inverter," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 22, pp. 678-690, July/Aug. 1986.
- [2] E. Twining, D. G. Holmes, "Modelling grid-connected voltage source inverter operation", Proceedings of the Australasian Universities Power Engineering Conf.(AUPEC-2001), Sep. 23-26, 2001, pp. 501-506.
- [3] Z. L. Gaing, "A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system, IEEE Trans. on energy conversion, vol. 19, no. 2, pp. 384-391, June 2004.
- [4] S. Easter Selvan, S. Subramanian and S. T. Solomon, "Novel technique for PID tuning by particle swarm optimization", Proc. Seventh annual swarm users/researchers conference, Apr. 13-15, 2003.
- [5] T. O'Mahony, C. J. Downing and K. Fatla, "Genetic Algorithms for PID Parameter Optimization: Minimizing Error Criteria", Proc. of Process and Instrumentation 2000, Jul. 26-27.
- [6] H. Yoshida, K. Kawata and Y. Fukuyama, "A particle swarm optimization for reactive power and voltage control considering voltage security assessment", IEEE Trans. on Power Sys., vol. 15, pp. 1232-1239, Nov. 2000.
- [7] M. B. Lindgren, "Analysis and simulation of digitally-controlled grid-connected PWM converters using the space-vector average approximation", Proceedings of the 5th IEEE workshops on Computers in Power Electronics, pp 85-89, 1996