

AVR의 응답속도개선을 위한 제어기법에 관한 연구

이형기¹ · 김송현¹ · 김현수¹ · 김기량¹ · 김관형^{2*}

Control techniques for improving response of the AVR

Hyung-ki Lee¹ · Song-Hyun Kim¹ · Hyun-soo Kim¹ · Gi-ryang Kim¹ · Gwan-Hyung Kim^{2*}

¹Department of Control and Instrumentation Engineering, Pukyong National University, Busan 48547, Korea

²Department of Computer Engineering, Tongmyong University, Busan 608-711, Korea

요 약

발전기의 전압조정장치(AVR)를 이용하여 전압을 조절하는 방식은 기존 아날로그방식과 교체중인 디지털방식을 나눌 수 있다. 일반적으로 브러시리스형의 여자시스템을 이용하여 전압을 조절할 경우 전부하에 대하여 전압변동을 작게 하여야 한다. AVR의 제어방법으로 PID(비례-적분-미분)제어방식이 많이 사용되고 있다. 그러나 이 제어기법은 제어대상에 대하여 제어기의 파라미터를 조절하여 과도응답을 줄이고 있다. 따라서 제어대상이 달라질 경우 다시 제어기의 파라미터를 다시 설정해야하는 문제점이 있다. 본 연구에서는 제어대상의 파라미터 변동에 대하여 제어기의 파라미터를 재설정 필요없이 iPID(intelligent PID)제어기를 이용하여 발전기 AVR시스템에 적용하여 전부하시에도 전압변동이 작은 응답을 얻도록 설계하고 시뮬레이션과 실험을 통하여 과도응답을 개선하였다.

ABSTRACT

Method for regulating voltage using a generator voltage regulating device (AVR) is divided in an existing analog system and a digital replacement. Typically, to adjust the voltage by using a brushless excitation system of the type to be reduced for a voltage change under all. The control method of the AVR as a PID (proportional-integral-differential) control method is widely used. However, the control scheme is to reduce the transient response of the control parameters of the controller to the control object. Therefore, if the control target should change, there is a problem, reset the parameters of the controller again. In this study, without having to reset the parameters of the controller for the parameter variations to be controlled iPID (intelligent PID) using a controller designed to obtain a generator AVR system voltage variation is small in response to full load is applied to and through simulations and experiments improved transient response.

키워드 : 자동전압조정기, 여자시스템, 역률, 제어기

Key word : intelligent PID, Transient Response, Emergency Generator, Exit system, etc

Received 02 October 2015, Revised 30 October 2015, Accepted 09 November 2015

* **Corresponding Author** Gwan-Hyung Kim(E-mail:taichiboy1@gmail.com, Tel:+82-51-629-1182)
Department of Computer Engineering, Tongmyong University, Busan 608-711, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2015.19.11.2534>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서론

비상발전기용 AVR시스템에서 일반적으로 많이 사용되는 고전적인 제어기법으로 PID제어기가 일반적으로 널리 사용되고 있다. 이러한 제어기법은 조절해야할 파라미터 수가 적으며, 비레이득, 적분시간 및 미분시간을 최적으로 조절하는 방식이며 그 사용이 용이하다는 특징이 있다. 그러나 제어대상의 파라미터 변동 등에 대하여 제어기의 파라미터를 재조정해야하는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 PID제어기의 파라미터조정에서 오토튜닝에 관한 연구가 진행되어 왔다. 또한 제어대상이 고차항인 시스템의 경우 파라미터의 조정 곤란 할 경우가 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 iPID(intelligent PID)라는 제어기법이 있다[1-5].

이 제어기법의 특징은 제어대상의 모델링이 필요하지 않는다. 구조는 일반적인 PID제어기와 같이 단순지만 제어대상의 파라미터 변동에 대하여 제어기의 파라미터를 재조정 할 필요가 없다. 이러한 장점을 이용하여 기존의 PID 제어기를 대체할 수 있는 제어기법 중 하나이다. 본 연구에서는 iPID를 이용하여 비상발전기의 AVR장치에 적용하였다[6-8].

사용된 비상발전기는 Brushless excitation system으로 AC exciter의 계자전압을 PWM으로 제어하여 전부하시에 과도응답을 개선하였다. 연구한 iPID제어기는 NI사의 sbrio 9636을 이용하여 구현 하였다. 시뮬레이션을 통하여 iPID의 실효성을 고찰하고 iPID를 이용한 AVR을 600[kW] 비상발전기의 부하시험(역율 0.2)을 하여 기존의 AVR(TD_SX440.GB)와 비교 고찰하였다.

II. iPID제어방법

문헌[3]에서 제안한 iPID제어기이론을 나타낸다. 제어대상의 다이내믹 제어입력 $u(t)$ 와 제어량 $y(t)$ 에 대한 미분방정식은 식(1)과 같다.

$$y^{(m)}(t) = f(y^{(m-1)}(t), \dots, \dot{y}(t), y(t), u^{(l)}(t), \dots, \dot{u}(t), u(t)) \quad (1)$$

으로 표현 할 수 있다. iPID에서 제어대상을

$$y^{(n)}(t) = F(t) + \alpha u(t) \quad (2)$$

와 같이 모델화 한다.

여기서 n 는 미분계수이며 1또는 2이다. 식(1)의 미분계수 $m-1$ 와 직접적인 관련이 없다. 일반적으로 $F(t)$ 는 식(2)의 $\alpha u(t)$ 이외의 모든 항을 나타내고 있는 것으로, 일반적으로 $u(t)$, $y(t)$ 및 이들의 고계미분의 비선형함수로 이루어지며 모든 정보가 $F(t)$ 에 포함되어 있다고 볼수 있다. 임의의 시각에 있어서 $F(t)$ 값은 $u(t)$ 와 $y^n(t)$ 를 이용하여 실시간으로 계산되어 질 수 있다. $n=2$ 인 경우 iPID제어기의 제어입력 $u(t)$ 는

$$u(t) = \frac{1}{\alpha}(-F(t) + y_r^{(n)}(t) + K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + \sum_{i=1}^{n-1} K_{di} e^{(i)}(t)) \quad (3)$$

여기서,

$y_r(t)$ 는 목표신호

$e(t) = y_r - y$ 는 추종오차

K_p, K_i, K_{di} 는 PID계인이다.

또한 페루프응답의 $n=2$ 인 경우 오차 방정식은

$$\ddot{e}(t) + K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + \sum_{i=1}^{n-1} K_{di} e^{(i)}(t) = 0 \quad (4)$$

Hurwitz다항식에서 PID이득을 정하기위해서 $e \rightarrow 0$ 으로 수렴해야 하기 때문에 식(4)를 라플라스 변환하면 페루프의 특성방정식은

$$f_2(s) = s^3 + K_d s^2 + K_p s + K_i \quad (5)$$

식(5)를 이용하여 안정한 K_p, K_i, K_d 를 설정한다.

식(3)의 $F(t)$ 가 미지이기 때문에 식(2)를 이용하여 실시간으로 계산해야할 필요가 있다. 이를 위하여 식(2)의 $u(t)$ 대신에 작은 값을 가지는 $h(t) (> 0)$ 만큼 이전의 값 $u(t-h)$ 를 사용한다. 즉 $F(t)$ 대신에

$$|F(t)|_e = \ddot{y}(t) - \alpha u(t-h) \quad (6)$$

단, $u(t-h) \cong u(t)$ 의 추정값을 사용한다.

$$u(t) = \frac{1}{\alpha}(-\beta \ddot{e}(t) + \alpha u(t-h) + K_I e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \dot{e}(t)) \quad (7)$$

여기서 β 는 응답의 속응성을 개선하기 위하여 미분기의 이득을 조절하기 위하여 설정한 것이다. 일반적으로 $\beta > 1$ 값을 인가한다.

식(7)을 이용하여 iPID제어시스템을 구성하면 Fig.1 과 같다.

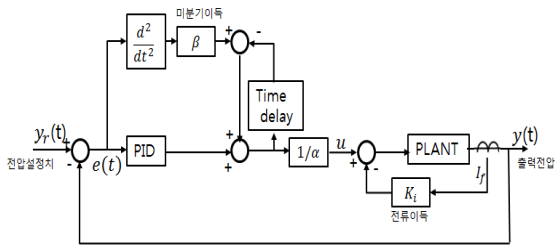


Fig. 1 The structure of the iPID control system

III. iPID제어기를 이용한 시뮬레이션

Fig.1의 iPID를 이용하여 시뮬레이션을 하기 위하여 여자기의 등가회로는 다음과 같다.

$$Z_c = \frac{1}{L} \frac{1}{s + \frac{R}{L}} = 1.37 \frac{1}{s + 43.8} \quad (8)$$

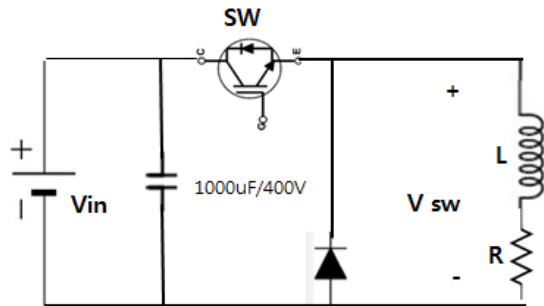


Fig. 2 The equivalent circuit of the exciter

여기서 $L=730\text{mH}, R=32\Omega$ 이다. 식(8)과 발전기의 전달함수를 이용하여 시뮬레이션을 행하였다.

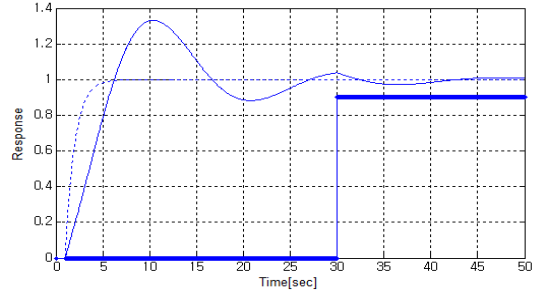


Fig. 3 Step Response of the PID

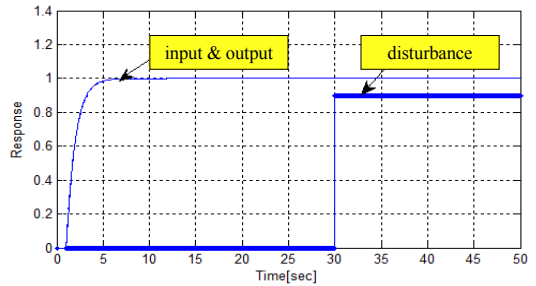


Fig. 4 Step Response of the iPID

Fig.3과 Fig.4에서 PID와 iPID제어기에서 $K_p = 10$, $K_i = 5, K_d = 10$, $\alpha = 1.25$ 및 시간 지연 h 는 20msec 을 사용하였다. Fig. 3의 PID제어시스템의 스텝응답은 과도응답이 매우 큰 것을 알 수 있으며 외란에 대해서도 과도응답이 발생하였다. 그러나 iPID제어기는 스텝 입력에 대하여 과도응답이 매우 적은 것을 알 수 있다. 그리고 외란에 대해서도 과도응답이 매우 작게 나타내었다[8, 9].

IV. iPID제어기를 이용한 AVR

Fig.5은 iPID를 이용한 비상발전기용 AVR시스템의 개략도를 나타낸 것이다.

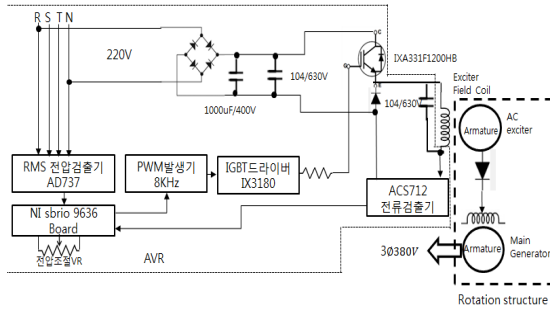


Fig. 5 Configuration of the emergency generators AVR system of iPID

Fig.5에서 iPID제어기는 NI sbrio-9636을 이용하여 구성하였다. 브러시리스 여자기의 전압은 PWM신호와 sbrio-9636에서 연산된 $u(t)$ 로 제어되어 진다. iPID제어기를 이용한 AVR시스템은 3상 상전압을 검출하여 실패치로 변환하여 제어기에 귀환 시키고 설정치와 비교하여 편차를 연산한다. 사용한 PWM신호의 주파수는 8kHz를 사용하였으며 이 신호는 IGBT 드라이버 회로를 통하여 여자기의 계자코일 전압을 제어한다. 계자전압의 전원은 220[V] 상전압을 브릿지 회로와 콘덴서 평활회로를 이용하고 IGBT로 계자전압을 제어한다. AVR의 설정전압은 정격전압의 $\pm 10\%$ 를 외부에서 설정할 수 있도록 외부에 전압조정용 볼륨을 설계하였다. 또한 계자전류를 귀환시키기 위하여 ACS712-20전류센서를 통하여 계자전류를 검출할 수 있도록 하였다.

iPID제어프로그램 Labview를 이용하여 sbrio-9636 보드의 FPGA에 저장하여 리얼타임으로 구동할 수 있도록 하였다. Fig.6은 iPID제어프로그램을 나타낸 것이다.

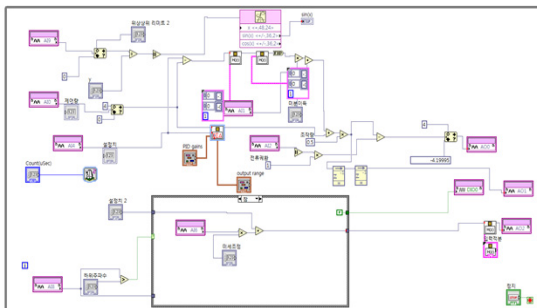


Fig. 6 iPID control program of Labview

Fig.6에서 $K_p = 10, K_i = 0.0078, K_d = 125$ 이며 $\alpha = 2, \beta = 1, h$ 는 180usec를 이용하여 600[kW]발전기의 부하 시험을 통하여 iPID의 유효성을 실험하였다.

V. 실험 및 고찰

Fig.7은 NI sbrio-9636을 이용한 iPID AVR장치를 나타낸 것이다. 이장치를 이용하여 비상발전기의 저항 부하(역율1)일 경우는 부하의 변동은 기존의 AVR에 비하여 전압변동이 적었다. 그리고 지상부하(역율 0.2)에 대하여 전부하시와 부하차단시의 응답특성을 기존의 제품과 비교 하였다.

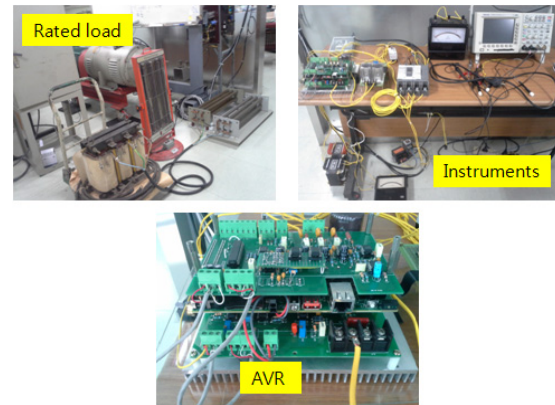


Fig. 7 Experiment device

Fig.8과 Fig.9는 전부하시의 특성을 나타낸 것이다. Fig.8에서 A→B 최소값과 최대값의 차이는 약69[V]이다. 따라서 정격전압에 대하여 약18%의 전압변동을 가지고 있다.

Fig.9에서 A→B 최소값과 최대값의 차이는 약21V이다. 따라서 정격전압에 대하여 약5.5%의 전압변동을 가지고 있다. 그러나 부하 차단시에 대한 응답 특성은 Fig.10과 Fig.11에 나타내었다.

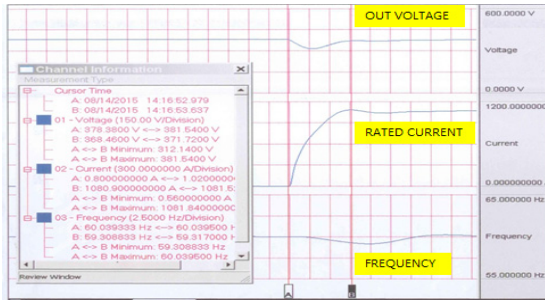


Fig. 8 Response of the PID -type AVR(Rating Load, Power factor 0.2)

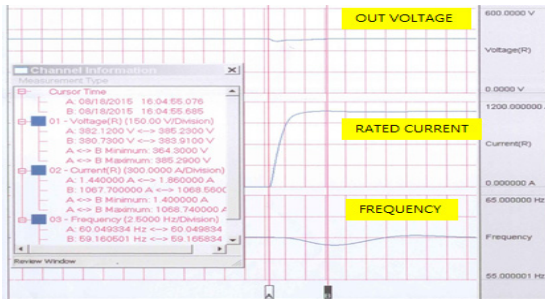


Fig. 9 Response of the iPID -type AVR(Rating Load, Power factor 0.2)

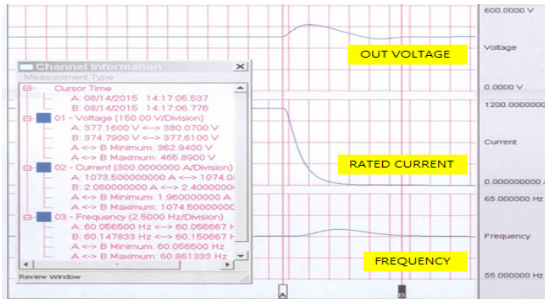


Fig. 10 Response of the PID -type AVR (No Load)

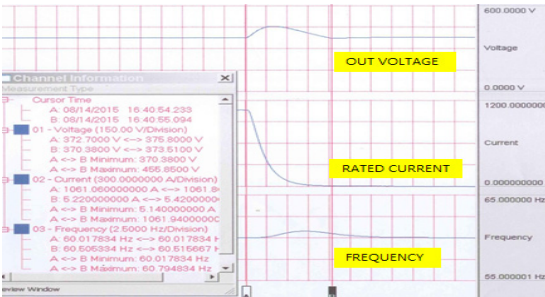


Fig. 11 Response of the iPID -type AVR (No Load)

Fig.10과 Fig.11에서 부하 차단시에는 주발전기의 역전압에 의하여 응답특성 기존 AVR과 iPID 적용한 AVR의 특성이 유사하였다.

VI. 결론

이상의 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기존의 PID제어기를 이용한 AVR시스템 보다 iPID 제어기를 이용한 AVR시스템이 전부하시에 탁월한 제어성능을 가졌다[8].
2. PID제어기의 파라미터를 식(5)를 이용하여 적당히 파라미터를 설정후 iPID동작을 실행하면 과도응답을 줄일 수 있다.
3. sbrio-9636과 같은 real time 싱글보드를 이용하여 시스템을 구축하면 정밀한 제어가 가능하다.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by a Research Grant of Pukyong National University(2015 year)

REFERENCES

- [1] H. Panagopoulos, K. Astrom & T. Hagglund, "Design of PID controller based on constrained optimization." *IEE Proceedings of Control Theory Application*, vol. 149, no.1, pp.32-40, 2002.
- [2] N. J. Killingworth and M. Krstic, "PID tuning using extremum seeking", *IEEE Control Systems Magazine* 26-2, pp.70-79, 2006.
- [3] M. Fliess and C. Join, "Intelligent PID controllers", *Proceeding of the 16th Mediterranean Conference on Control and Automation*, pp.326-331, 2008.
- [4] S. Inagaki, I. Muruta and Toshiharu, "On Stabilization by Intelligent PID Controlle", *SICE*, vol.49, no.7, pp.727-732, 2013.
- [5] M. Fliess and C. Join, "Model-Free control and intelligent PID controllers: Towards a possible trivialization of nonlinear Identification," pp.1531-1541, 2009.

- [6] Fliess, M., Join, C., Mboup, M., Sira-Ramírez, H., Vers une commande multivariable sans modèle, *Actes Conf. Francoph. Automat.* (CIFA-2006), Bordeaux, 2006. Available at <http://hal.inria.fr/inria-00001139/en/>.
- [7] Fliess, M., Join, C., Sira-Ramírez, H., Complex continuous nonlinear systems: their black box identification and their control, *Proc. 14th IFAC Symp. System Identif.* (SYSID-2006), Newcastle, Australia, 2006. Available at <http://hal.inria.fr/inria-00000824/en/>.
- [8] H. K. Lee, S. H. Kim, Y. W. Choe, Y. J. An, H. S. Kim and G. R. Kim, "Improving Transient Response of Emergency Generator AVR System", *CICS*, pp.256~257, 2015.
- [9] H. K. Lee, S. H. Kim, Y. W. Choe, Y. J. An, H. S. Kim and G. R. Kim, "Improvement on the responsiveness of Digital AVR System," in *Proceeding of the conference on information and communication engineering*, Sinra University, pp.246~247, 2015.



이형기(Hyung-ki Lee)

부경대학교 제어계측공학과 교수, 공학박사
 ※ 관심분야 : 제어공학



김송현(Song-Hyun Kim)

부경대학교 제어계측공학과 박사과정
 L&A대표
 ※ 관심분야 : 제어공학, 모니터링시스템, 공장자동화시스템



김현수(Hyun-soo Kim)

부경대학교 제어계측공학과 박사과정
 도현테크 대표
 ※ 관심분야 : 자동제어, IoT, 자율주행 로봇, 모니터링시스템



김기량(Gi-ryang Kim)

부경대학교 제어계측공학과 박사과정
 한국폴리텍대학교 교수
 ※ 관심분야 : 자동제어, IT-솔루션, 컴퓨터시스템



김관형(Gwan-Hyung Kim)

동명대학교 컴퓨터공학과 교수, 공학박사
 ※ 관심분야 : 인공지능, 임베디드시스템 설계, 제어공학