

ORC 발전 시스템에서 주파수 가변형 PR 제어기와 정상분 추출을 이용한 발전기 속도추정 방법

박형석, 허홍준, 김장목
부산대학교

Speed Estimation Method of Turbine and Generator using Variable Frequency type PR controller and Positive-phase-sequence Component Computation in ORC Generation System

Hyung Seok Park, Hong Jun Heo, Jang Mok Kim
Pusan National University

ABSTRACT

본 논문에서는 유기랭킨 사이클(organic rankine cycle: ORC) 발전 시스템에서 터빈과 발전기의 속도를 추정하는 방법을 제안한다. 다이오드 정류기에 의해 왜곡된 발전기 3상 단자 전압은 PLL 기법을 이용한 속도추정의 성능을 저하시키므로, 정상분 추출과 맥동성분 제거를 위한 상태관측기와 주파수 가변형 PR 제어기를 동기좌표계 PLL 기법에 적용하여 발전기의 속도를 추정한다. 제안하는 터빈과 발전기의 속도추정 방법은 실험 결과를 통해 그 성능을 검증한다.

1. 서 론

ORC 발전 시스템에서 터빈의 출력 변동이나 정격이상의 출력 증가는 터빈과 발전기의 속도맥동을 발생시키거나 정격이상으로 속도를 증가시킨다. 이는 발전기의 토크맥동과 함께 소음과 진동을 유발하며, 시스템의 수명과 한계, 효율, 안전상의 문제 등에 악영향을 미친다. 따라서, 계통 연계된 전력변환 시스템에서 터빈과 발전기의 속도를 일정하게 제어할 필요가 있다.

그러나 증기터빈의 고온 다습한 환경으로 인해, 터빈과 직결된 발전기에 위치 및 속도 센서를 직접적으로 부착하는 것은 측정오차 및 센서고장을 야기 시킨다. 그러므로 위치 및 속도 센서 없이 속도를 측정하는 방법이 필요하며, 일반적으로 계통 전압의 위상각을 추정하기 위한 PLL 기법을 발전기 단자전압에 적용하여 속도를 추정할 수 있다.

그러나 고속의 터빈운전에 따른 발전기측 다이오드 정류기의 사용으로 인해, 발전기의 3상 단자전압은 그림 1과 같이 불연속적인 비정현파 형태를 가지게 되고, 그 주파수 또한 속도에 따라 변한다. 이에 따라 기존의 PLL 위상각 추정 방식으로는 추정속도에 심각한 맥동이 포함되고, 정확한 속도추정이 어렵다. 따라서 왜곡된 단자전압에서도 정확한 속도를 추정할 수 있는 속도추정 알고리즘이 필요하다.

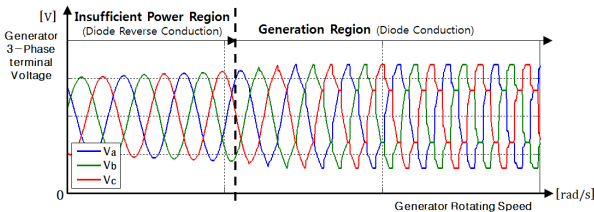


그림 1. 발전기의 3상 단자전압 파형
Fig. 1 3-phase terminal voltage waveform of generator

2. 속도 추정 방법

2.1 동기좌표계 PLL 기법[1]

일반적으로 계통의 위상각을 추정하기 위한 기존의 동기좌표계(synchronous reference frame: SRF) PLL기법이 그림 2에 나타난다. 동기좌표계 PLL 기법을 발전기 속도추정에 적용할 경우, 발전기 3상 단자전압을 좌표변환하고, PI 제어기를 통해 동기좌표계 d축 전압을 '0'으로 제어하여 속도를 추정할 수 있다. 그러나 이 방법은 전압 왜곡이 심한 발전기 단자전압의 조건에는 적합하지 못하므로 추가적인 기법의 적용이 필요하다.

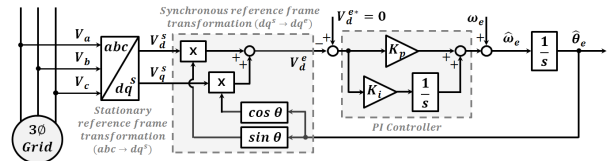


그림 2. 동기좌표계 PLL 기법의 블록도
Fig. 2 Block diagram of SRF-PLL method

2.2 상태관측기를 이용한 정상분 추출[2]

상태관측기를 이용하여 왜곡된 전압의 정상분을 추출할 수 있으며, 정지좌표계 d q축 전압의 정상분 전압을 추출하기 위한 상태관측기식은 식 (1)과 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{V}_{pd}^s \\ \hat{V}_{pq}^s \\ \hat{V}_{nd}^s \\ \hat{V}_{nq}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\hat{\omega} & 0 & 0 \\ \hat{\omega} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \hat{\omega} \\ 0 & 0 & -\hat{\omega} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}_{pd}^s \\ \hat{V}_{pq}^s \\ \hat{V}_{nd}^s \\ \hat{V}_{nq}^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} \\ l_{21} & l_{22} \\ l_{31} & l_{32} \\ l_{41} & l_{42} \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} V_d^s \\ V_q^s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}_{pd}^s \\ \hat{V}_{pq}^s \\ \hat{V}_{nd}^s \\ \hat{V}_{nq}^s \end{bmatrix} \right\} \quad (1)$$

[2]의 일정한 계통 전원의 주파수와 달리, 발전기 속도추정에 적용된 상태방정식의 ω 은, 피드백된 추정 각속도 $\hat{\omega}$ 을 사용한다. 출력되는 정/역상분의 d q축 정지좌표계 전압 중 정상분의 d q축 전압만 동기좌표계 d축 전압의 변환을 위해 사용된다.

그러나, 변동하는 추정속도에 따라 이득조절이 필요한 이득 L 에 의해 정상분 전압의 추출능력이 저하되며, 이에 따라 변환된 동기좌표계 d축 전압에는 여전히 맥동성분이 포함 된다.

2.3 비례공진(PR) 제어기를 이용한 맥동 제거[3]

다이오드 정류기에 의해 왜곡된 3상의 단자전압을 이용하여 변환된 동기좌표계 d축 전압은 6차와 12차 고조파 맥동성분을 포함하며, 비례공진(proportional resonant: PR) 제어기의 고조파 보상항을 이용하여 이를 제거할 수 있다. 그러나, 일반적인

PR제어기는 일정한 공진주파수를 갖는 신호에 사용하는 것이 적합하므로, 속도추정에 적용할 경우에는 기본주파수가 변화가 가능한 주파수 가변형 PR제어기를 사용하여야 한다. 6차와 12차 고조파 보상항을 가지는 주파수 가변형 PR제어기의 전달함수는 식 (2)와 같이 표현된다. 여기서, ω_0 는 기본파의 공진주파수, $h\omega_0$ 는 고조파의 공진주파수이며, K_p , K_{ih} , K_{Bh} 는 각각 비례이득, 공진이득, 대역폭 이득이다. 공진 주파수 ω_0 는 피드백된 추정 각속도 $\hat{\omega}_e$ 를 사용한다.

$$G_{PRhar}(s) = K_p + \sum_{h=6,12}^n \left[\frac{K_i h \omega_0 s}{s^2 + K_{Bh} h \omega_0 s + (h \omega_0)^2} \right] \quad (2)$$

고조파 보상항을 통해 추출된 동기좌표계 d축 전압의 6차와 12차 고조파 맥동성분을 원 신호에서 제거함으로써 맥동제거가 가능하다. 이러한 구성은 그림 3에 나타나며, 동기좌표계 d축 전압과 같이 일정한 값을 가지는 신호의 맥동 및 고조파 성분을 제거하기에 적합하다.

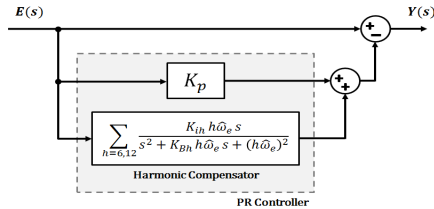


그림 3. 고조파 보상항을 가지는 주파수 가변형 PR 제어기의 블록도
Fig. 3 Block diagram of frequency variable type PR controller with harmonic compensation

2.4 제안하는 발전기 속도추정 알고리즘

제안하는 발전기의 속도추정 알고리즘이 그림 4에 나타나며, 정상분 상태관측기와 주파수 가변형 PR 제어기를 가지는 동기좌표계 PLL 기법이 발전기 3상 단자전압에 적용되는 구성을 가진다.

정지좌표계 d q축 전압 V_{dq}^s 은 발전기 3상 단자전압 V_{uvw} 으로부터 변환되며, 상태관측기를 통해 추출된 정상분의 정지좌표계 d q축 전압 \hat{V}_{pd}^s 과 \hat{V}_{pq}^s 은 동기좌표계 d축 전압 \hat{V}_d^e 으로 변환된다. 주파수 가변형 PR 제어기를 통해 고조파 맥동성분이 제거된 새로운 동기좌표계 d축 전압 $\hat{V}_{d,pr}^e$ 은 PI 제어기로 전달되고, 발전기의 속도가 추정된다. 추정된 속도 $\hat{\omega}_e$ 는 다시 상태관측기와 주파수 가변형 PR 제어기에 피드백 되며, 전 동기의 극수가 고려되어 기계적 속도로 변환된다.

3. 실험 결과

제안하는 발전기의 속도추정 알고리즘에 대한 실험결과가 그림 5와 6에 나타난다. 기존의 동기좌표계 PLL 기법을 속도추정에 적용한 결과와 제안하는 방법의 속도추정 결과를 확인

할 수 있다. 제안하는 방법을 이용하여 추정된 발전기 속도는 맥동이 크게 감소된 것을 확인할 수 있다.

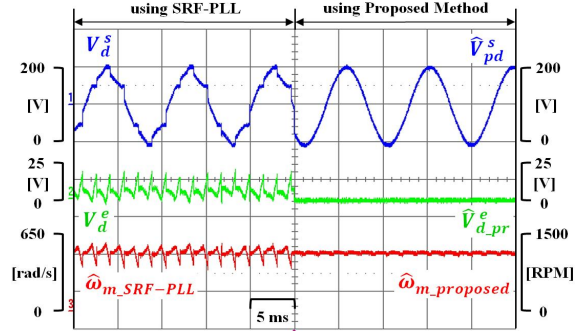


그림 5. 발전 영역에서 발전기 속도 추정 결과
Fig. 5 Generator speed estimation result in generation region

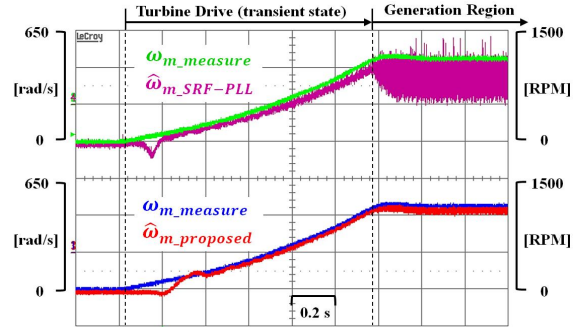


그림 6. 전 영역에서 발전기 속도 추정 결과
Fig. 6 Generator speed estimation result in full region

4. 결론

본 논문에서는 정상분 상태관측기와 주파수 가변형 PR 제어기를 가지는 동기좌표계 PLL 기법을 이용하여, 다이오드 정류기에 의해 왜곡된 발전기 단자전압 조건에도 발전기의 속도 추정이 가능한, ORC 발전 시스템의 터빈과 발전기 속도추정 알고리즘을 제안하였다. 속도추정 실험결과를 통해 제안된 속도추정 알고리즘의 유효성을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] V. Kaura, V. Blasko, "Operation of a Phase Locked Loop System Under Distorted Utility Conditions", IEEE Trans. Ind. App., Vol. 33, No. 1, pp. 58-63, 1997, Jan./Feb.
- [2] 김형수, 최중우, "정상분 전압 관측기를 이용한 불평형 3상 전원의 PLL", 전력전자학회 논문지, 제13권, 제2호, pp. 145-151, 2008.
- [3] Lascu, C., Asiminoaei, L., Boldea, I., Blaabjerg, F., "High Performance Current Controller for Selective Harmonic Compensation in Active Power Filters", IEEE Transactions on, Vol. 22, No. 5, pp. 1826-1835, 2007.

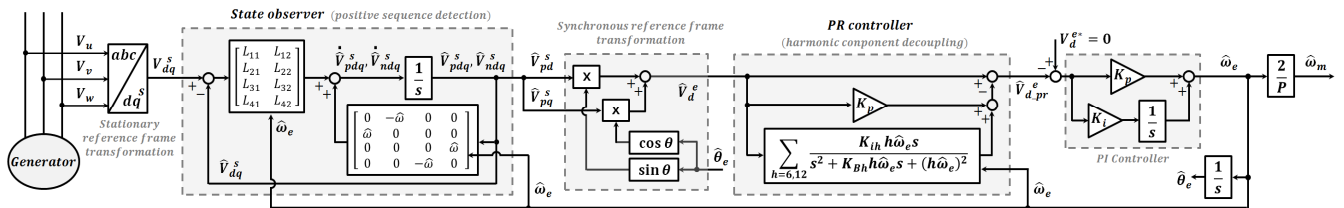


그림 4. 제안하는 발전기 속도추정 방법의 블록도
Fig. 4 Block diagram of proposed generator speed estimation method