

영구자석 동기발전기의 위치센서 고장 회피 제어

李光雲[†]

Position Sensor Fault Tolerant Control of Permanent Magnet Synchronous Generator

Kwang-Woon Lee

요 약

영구자석 동기발전기의 벡터제어를 위해서는 회전자 위치가 필요하며 엔코더와 같은 위치센서가 위치 검출 목적으로 일반적으로 사용되고 있다. 그러나 위치센서의 사용은 영구자석 동기발전기 제어시스템의 신뢰성을 저하시킨다. 본 논문에서는 영구자석 동기발전기 제어시스템을 위한 위치센서 고장 회피 제어 방법을 제안한다. 확장 유기 전력에 기반한 센서리스 위치 추정 알고리즘을 센서를 이용하는 벡터 제어와 병렬로 수행함으로써 위치센서 고장 발생 시점에서 센서리스 벡터제어로 신속히 재구성할 수 있도록 하였다. 실험을 통해 제안된 방식의 유용성을 보인다.

ABSTRACT

Rotor position is essentially required for vector control of permanent magnet synchronous generator(PMSG) and position sensor such as encoder are generally used for the purpose of position sensing. However, the use of position sensor degrades reliability of PMSG control system. This paper presents position sensor fault tolerant control method for PMSG control system. Sensorless position estimator based on extended electromotive force(EMF) is operated in parallel with sensed vector control to provide rapid reconfiguration capability to sensorless vector control at the moment of position sensor fault detection. Experimental results show the effectiveness of the proposed method.

Key Words : Permanent Magnet Synchronous Generator, Position Sensor Fault Tolerant Control

1. 서 론

최근 풍력 발전 분야에서는 기어박스(gearbox) 사용으로 인한 고장 및 유지 보수 문제를 해결할 목적으로 직접 구동 방식의 다극(multi-pole) 영구자석 동기발전기를 적용하는 연구개발이 진행되고 있다.^[1] 영구자석 동기발전기를 사용하는 풍력 발전 시스템에서는 발전 용량과 동일 용량의 백투백(back-to-back) 방식 전력

변환회로를 일반적으로 채용하고 있으며, 영구자석 동기발전기의 빠른 토크 제어 특성을 얻기 위해서 벡터 제어가 적용되고 있다.^[2,3] 벡터 제어의 구현을 위해서는 영구자석 동기발전기의 회전자 위치 정보가 필수적으로 요구되는 데, 엔코더 또는 레졸버와 같은 위치 검출 센서의 사용은 센서 고장 등의 이유로 인해 시스템의 신뢰성을 저하시킬 수 있다.^[4] 위치 검출 센서를 사용하지 않고서 센서리스 제어기법만을 사용하여 위치 정보를 간접적으로 구하려는 시도가 이루어지고 있으나, 센서리스 제어 알고리즘의 회전자 위치 및 속도 추정 정확도가 기기의 제정수 변동, 전력 변환 소자의 전압 강하 및 데드 타임(dead-time) 등에 의해 영향을

[†]교신저자 : 정회원, 목포해양대 해양전자통신공학부 조교수
E-mail : kwlee89@mmu.ac.kr
접수일자 : 2011. 3. 10 1차 심사 : 2011. 4. 18
2차 심사 : 2011. 5. 26 심사완료 : 2011. 5. 29

받기 때문에 센서리스 제어 기법만을 사용하여 영구자석 동기발전기를 최적의 운전 조건으로 운전하는 것이 어렵다.^[4-6] 따라서, 정상 조건에서는 위치 센서를 사용하여 제어를 하고 위치 센서 고장이 발생했을 때에만 고장을 신속히 감지하여 센서리스 제어 방식으로 전환함으로써 임시적으로 연속 운전을 가능하게 하는 위치 센서 고장 회피 제어 방식이 영구자석 동기발전기 제어시스템의 신뢰성 확보를 위해 필요하다.

이중여자 유도발전기(doubly fed induction generator)를 대상으로 위치 센서를 통해 검출한 위치 정보와 별도로 추정한 위치 정보 각각을 입력으로 하는 독립적인 속도 관측기 2개를 구성하고, 각 속도 관측기의 궤환 신호 크기를 서로 비교함으로써 위치 센서 고장을 감지하는 방식이 제안되었다.^[7] 그러나 이 방식에서는 속도 관측기의 이득이 적절하게 설계되지 못한 경우 고장 감지 시간이 길어질 수 있고, 고장으로 확정되기까지 일정 시간동안 개-루프(open-loop) 제어를 수행하기 때문에 이중여자 유도발전기에 비해 상대적으로 인덕턴스가 작은 영구자석 동기발전기에 적용하는 경우 고장 모드 감지 후 센서리스 제어 모드로 전환되는 과도적인 구간에서 바람직하지 못한 토크 맥동이 발생할 우려가 있다.

본 논문에서는 영구자석 동기발전기를 대상으로 위치 센서의 고장을 신속히 감지하여 센서리스 제어 모드로 전환함으로써 과도 상태에서의 토크 맥동을 최소화할 수 있는 위치 센서 고장 회피 제어 방법을 제안하고자 한다. 제안된 방식에서는 영구자석 동기발전기가 정상 조건으로 운전되고 있는 상황에서도 확장 유기전력 기반의 센서리스 위치 추정기를 동시에 동작시켜 회전자 위치 및 속도를 추정하고, 위치 센서의 고장으로 인해 센서 출력이 중단되면 즉시 센서리스 제어모드로 전환한다. 실험을 통해 제안된 위치 센서 고장 회피 제어 방법의 효과를 입증한다.

2. 확장 유기전력 기반의 센서리스 위치 및 속도 추정^[4-6]

그림 1은 영구자석 동기발전기의 공간 벡터도를 나타낸 것이다. 그림 1에서 α, β 축은 고정자 권선을 기준으로 각각 a상의 자계 축(magnetic axis)과 수직 축에 해당하는 고정 좌표축이고, d,q축은 회전자의 영구자석을 기준으로 각각 자속 축과 토크 축에 해당하는 회전자 동기 좌표축이며, γ, δ 축은 제어 시스템에서 인지하는 자속 축과 토크 축이다. 회전자의 위치는 α 축

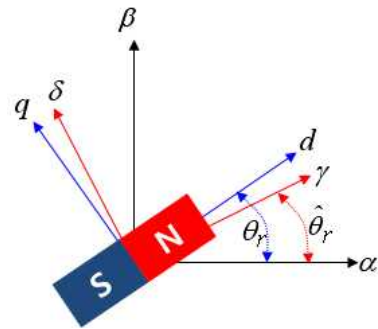


그림 1 영구자석 동기발전기의 공간벡터도
Fig. 1 Space vector diagram of PMSG

에 대한 d축의 상대적인 위치로 θ_r 에 해당하고, 제어 시스템에서 인지하는 회전자 위치는 α 축에 대한 γ 축의 상대적인 위치로 $\hat{\theta}_r$ 에 해당한다. 회전자 동기 좌표계 d,q축에서 영구자석 동기발전기의 전압 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + pL_d - \omega_r L_q & \\ \omega_r L_d & R + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \lambda_{PM} \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)에서 v_d, v_q 와 i_d, i_q 는 각각 d,q축 전압 및 전류, R 은 상저항, L_d, L_q 는 d,q축 인덕턴스, ω_r 은 회전자 전기각속도, λ_{PM} 은 역기전력 상수, p 는 미분연산자이다. 다음과 같이 확장 유기전력(extended electromotive force)을 정의하고,

$$E_{ex} = \omega_r [(L_d - L_q)i_d + \lambda_{PM}] - (L_d - L_q)(pi_q) \quad (2)$$

식 (1)을 확장 유기전력을 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + pL_d - \omega_r L_q & \\ \omega_r L_q & R + pL_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ E_{ex} \end{bmatrix} \quad (3)$$

그림 1에서 d축과 γ 축 사이에 $\Delta\theta = \theta_r - \hat{\theta}_r$ 의 오차가 있을 때 d축과 γ 축의 전기각속도가 동일하다고 가정하면, γ, δ 축에서 영구자석 동기발전기의 전압방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} v_\gamma \\ v_\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + pL_d - \omega_r L_q & \\ \omega_r L_q & R + pL_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\gamma \\ i_\delta \end{bmatrix} + E_{ex} \begin{bmatrix} -\sin\Delta\theta \\ \cos\Delta\theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

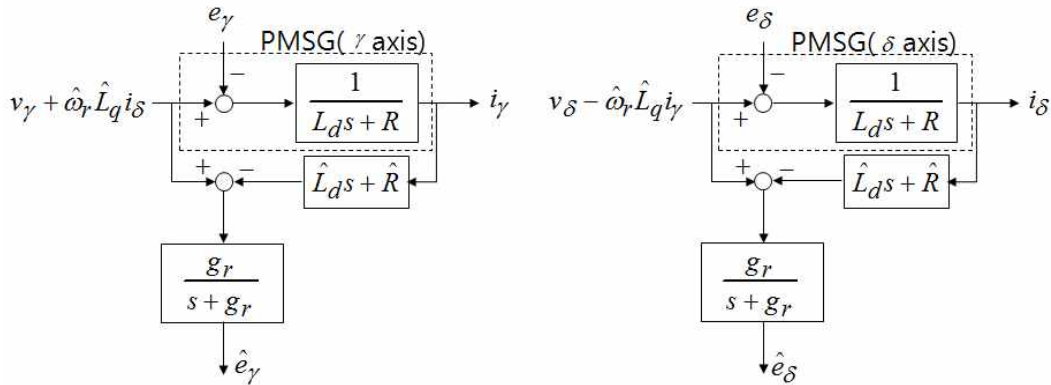


그림 2 확장 유기전력 추정기의 구조
Fig. 2 Structure of extended EMF estimator

γ, δ 축에서의 확장 유기전력 e_γ, e_δ 를 다음과 같이 정의하면, 그림 2에 나타난 바와 같이 γ, δ 축에서의 확장 유기전력 e_γ, e_δ 를 추정할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} e_\gamma \\ e_\delta \end{bmatrix} = E_{ex} \begin{bmatrix} -\sin\Delta\theta \\ \cos\Delta\theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

그림 2에서 g_r 은 저역통과 필터의 대역폭, $\hat{\omega}_r$ 은 추정 속도, $\hat{R}, \hat{L}_d, \hat{L}_q$ 는 확장 유기전력 추정기에서 사용하는 영구자석 동기발전기의 제정수이다. 저항은 온도, 인덕턴스는 자기회로의 포화에 따라 변화하기 때문에, 그림 2에서 영구자석 동기발전기의 제정수를 고정 값으로 사용하는 경우 추정된 확장 유기전력에 오차가 포함될 수 있다. 인덕턴스 변동에 따른 확장 유기전력 추정 오차는 전류 변동에 따른 인덕턴스 변동 값을 룩업 테이블(look-up table)형태로 저장하고 전류 변동에 따라 추정기에 사용되는 인덕턴스 값을 테이블을 기준으로 변동시킴으로써 줄일 수 있다.

확장 유기전력 추정에서 전류를 케환받는 부분에 미분기가 사용되어 추정 성능을 저하시킬 수 있기 때문에, 실제 e_γ, e_δ 의 추정은 다음과 같이 저역통과 및 고역통과 필터를 사용하여 이루어진다.

$$\hat{e}_\gamma = (v_\gamma + \hat{\omega}_r \hat{L}_q i_\delta - \hat{R} i_\gamma) \left(\frac{g_r}{s + g_r} \right) - (g_r \hat{L}_d i_\gamma) \left(\frac{s}{s + g_r} \right) \quad (6)$$

$$\hat{e}_\delta = (v_\delta - \hat{\omega}_r \hat{L}_q i_\gamma - \hat{R} i_\delta) \left(\frac{g_r}{s + g_r} \right) - (g_r \hat{L}_d i_\delta) \left(\frac{s}{s + g_r} \right) \quad (7)$$

e_γ, e_δ 의 추정 값 $\hat{e}_\gamma, \hat{e}_\delta$ 을 이용하여 다음과 같이 $\Delta\theta$ 의 추정 값 $\Delta\hat{\theta}$ 을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \hat{e}_\gamma \\ \hat{e}_\delta \end{bmatrix} = E_{ex} \begin{bmatrix} -\sin\Delta\hat{\theta} \\ \cos\Delta\hat{\theta} \end{bmatrix} \rightarrow \Delta\hat{\theta} = \tan^{-1} \left(\frac{-\hat{e}_\gamma}{\hat{e}_\delta} \right) \quad (8)$$

$\Delta\hat{\theta}$ 을 이용하여 그림 3과 같이 PI 제어기를 이용하여 회전자 전기각($\hat{\theta}_r$) 및 전기각속도($\hat{\omega}_r$)를 추정할 수 있다. 그림 3에서 회전자 전기각(θ_r)과 추정된 전기각($\hat{\theta}_r$)사이의 전달 함수는 다음과 같다.

$$\frac{\hat{\theta}_r}{\theta_r} = \frac{K_{ep}s + K_{ei}}{s^2 + K_{ep}s + K_{ei}} \quad (9)$$

식 (9)에서 비례 및 적분 이득 K_{ep}, K_{ei} 는 다음과 같이 감쇠비(ξ)와 비감쇠 고유주파수(ω_n)를 이용하여 결정할 수 있다.

$$K_{ep} = 2\xi\omega_n, K_{ei} = \omega_n^2 \quad (10)$$

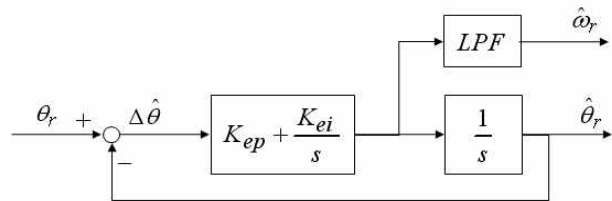


그림 3 전기각 및 전기각속도 추정기의 구조
Fig. 3 Structure of electrical angle and electrical angular speed estimator

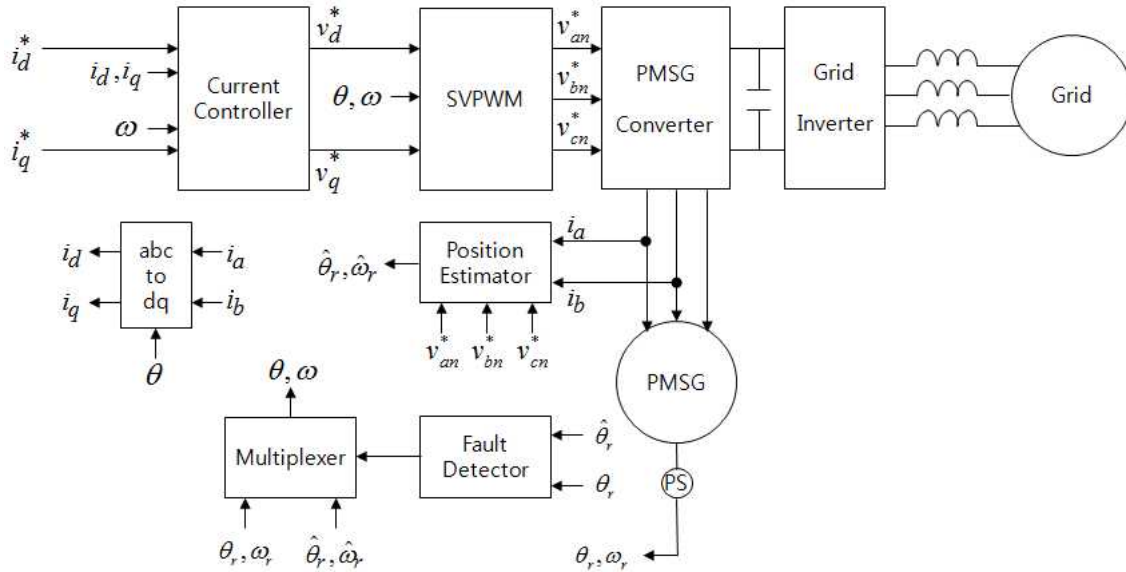


그림 4 위치센서 고장 회피 제어를 포함하는 영구자석 동기발전기 제어 블록도
 Fig. 4 Control block diagram of PMSG including position sensor fault tolerant control

3. 영구자석 동기발전기의 위치센서 고장 회피 제어

일반적으로 직접 구동 방식의 풍력발전에는 30극 이상의 영구자석 동기발전기가 사용되고 있으며, 리플버의 경우 위치 분해능이 높지 않기 때문에 회전자 전기각 검출 용도로 비교적 높은 분해능의 증분형 엔코더가 주로 사용되고 있다. 증분형 엔코더는 A,B,Z 출력 신호를 갖는 데, 4 체배 회로를 이용하여 위치 분해능을 4배 향상시킬 수 있다.

엔코더의 고장 유형으로는 기계적, 전기적 요인에 의한 파손, 엔코더 신호 선의 단락 및 개방 등이 있으며, 이러한 경우 엔코더 펄스 신호를 처리하는 신호 처리 모듈에 포함된 카운터의 값이 일정 값을 유지하게 된다. 회전체 관성으로 인해 운전 중에 갑작스럽게 영구자석 동기발전기의 회전자가 정지할 수 없으므로, 영구자석 동기발전기 운전 중에 앞에서 기술한 원인에 의해 엔코더가 고장이 나는 경우에는 엔코더 펄스 카운터의 값이 일정 값으로 유지되는 시점을 엔코더 고장 발생 시점으로 볼 수 있다. 이러한 경우, 엔코더 펄스 카운터의 값이 일정 값으로 유지되는 시점에 바로 센서리스 제어 모드로 전환하게 되면 비교적 적은 토크 맥동을 발생하면서 영구자석 동기발전기를 연속적으로 운전할 수 있다. 영구자석 동기발전기가 저속으로 운전되고 있는 상황에서는 PWM 제어 주기 간격

으로 검출한 회전자 위치 값이 일정한 값을 유지할 수 있기 때문에, 위치 센서 고장 판별의 오류를 방지하기 위해서는 현재의 회전자 순시 속도를 기준으로 위치센서 고장을 판별하기 위한 샘플링 주파수를 조절할 필요가 있다. 영구자석 동기발전기의 운전 속도 ω (단위: rpm) 및 엔코더 분해능 E_{PPR} (단위: PPR)을 기준으로 위치 센서 고장 여부를 판단하기 위한 샘플링 주파수 f_s 는 다음 조건을 만족해야 한다.

$$f_s < \frac{\omega \times E_{PPR}}{60} \quad (11)$$

엔코더와 회전체 사이의 기계적 결합이 느슨하게 되어 미끄러짐이 있는 경우에는 엔코더를 통해 구한 회전자 전기각과 센서리스 추정기에 의해 추정된 회전자 전기각 사이에 차이가 크게 발생하게 되므로, 엔코더를 통해 얻은 전기각과 추정한 전기각의 차이가 일정 값을 초과하는 경우 미끄러짐이 존재하는 것으로 판단하고 센서리스 제어 모드로 전환함으로써 연속 운전이 가능하다. 영구자석 동기발전기의 초기 기동 단계부터 회전자 위치 검출 기능에 고장이 발생하는 경우에는 센서리스 제어 모드로 연속 운전을 한다.

본 논문에서 제안하는 위치센서 고장 회피 제어를 포함하는 영구자석 동기발전기의 제어 시스템은 그림 4와 같다. 육상 전압 기반의 공간벡터 PWM에서 출력

하는 극전압 지령($v_{an}^*, v_{bn}^*, v_{cn}^*$)과 전류 센서를 이용해 검출한 상전류 값을 이용하여 확장 유기전력 기반의 추정기를 위치센서가 정상 조건일 때에도 동작시켜 회전자의 전기각 및 전기각속도를 지속적으로 추정한다. 그림 4의 고장 검출기(fault detector)는 엔코더로 검출한 전기각과 센서리스 추정기로 추정한 전기각을 비교하여 그 차이가 일정 값을 초과하게 되거나, 또는 영구자석 동기발전기 운전 중에 엔코더로 검출한 전기각이 일정 값을 유지하게 되면 위치센서 고장으로 판별한다. 그림 4의 멀티플렉서는 고장 검출기의 출력 신호에 따라 위치센서가 정상일 때에는 엔코더를 통해 검출한 회전자 전기각 및 전기각속도를 출력하고, 위치센서 고장일 때에는 센서리스 추정기로 추정한 전기각 및 전기각속도를 출력한다. 따라서, 위치 센서가 정상인 상태에서는 위치 센서로 검출한 회전자 위치 및 각속도 정보가 영구자석 동기 발전기 제어 목적으로 사용되고, 위치 센서가 고장으로 판별된 상황에서는 센서리스 추정기에 의해 추정된 회전자 위치 및 각속도 정보가 사용된다.

그림 2에 나타난 바와 같이 γ, δ 축에서의 확장 유기전력을 추정하기 위해서는 γ, δ 축에서의 전압(v_γ, v_δ) 및 전류 (i_γ, i_δ)가 필요하다. v_γ, v_δ 는 극전압 지령($v_{an}^*, v_{bn}^*, v_{cn}^*$)으로부터 상전압($v_{as}^*, v_{bs}^*, v_{cs}^*$)을 구하고, 추정한 전기각을 이용하여 γ, δ 축으로 변환함으로써 구할 수 있으며, i_γ, i_δ 역시 추정한 전기각을 이용하여 상전류를 γ, δ 축으로 변환함으로써 구할 수 있다.

4. 실험 결과

영구자석 동기발전기의 위치센서 고장 회피 제어 알고리즘의 동작 특성을 평가할 목적으로 그림 5와 같은 실험장치를 구성하였으며, 세부적인 구성은 그림 6과 같다. 2대의 영구자석 동기전동기를 커플링으로 결합하고, 하나의 전동기를 서보 제어기를 이용하여 500rpm의 속도로 운전함으로써 다른 전동기는 발전기로 동작하도록 하였다. 실험에 사용된 영구자석 동기발전기는 2.2kW급으로 8극 SPM(surface permanent magnet) 구조로서, 3000[PPR]의 분해능을 가지는 증분형 엔코더가 내장되어 있으며 전기적 제정수는 표 1과 같다. 영구자석 동기발전기의 3상 고정자 권선을 IPM(intelligent power module)으로 구성한 컨버터에 연결하였고, 컨버터의 직류 측에 300W급의 직류 전자부하를 연결하여 영구자석 동기발전기에서 발전된 전



그림 5 실험장치
Fig. 5 Experimental setup

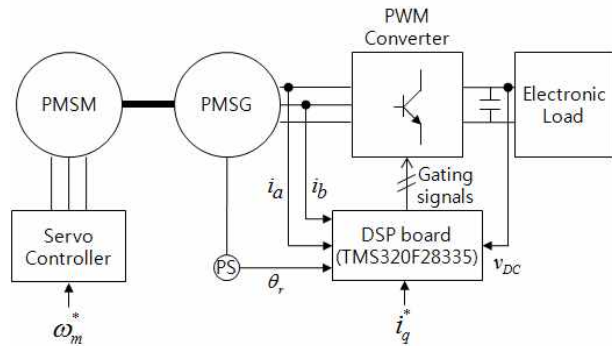


그림 6 실험장치의 세부 구성
Fig. 6 Detailed structure of experimental setup

표 1 영구자석 동기발전기의 제정수
Table 1 Parameters of PMSG

극수	8극
상저항(R_s)	0.152[Ω]
d-q축 인덕턴스(L_d, L_q)	1.91[mH]
역기전력 상수	0.082[V·sec/rad]

표 2 컨버터의 제어 사양
Table 2 Control specification of converter

스위칭 주파수	4[kHz]
데드 타임	3[us]
전류제어기 대역폭	200[Hz]
전류제어 주기	250[us]

력을 소비하도록 하였다. 영구자석 동기발전기의 전력 변환 제어를 위한 컨버터의 제어 사양은 표 2와 같다.

그림 7은 q축 전류 지령을 $-2[A]$ 로 설정하여 영구자석 동기발전기를 운전하고 있는 상태에서 엔코더 출력 신호를 단선했을 때의 실험 파형이다. 엔코더의 출력 신호가 단선되면 엔코더 출력 펄스를 계수하는 카

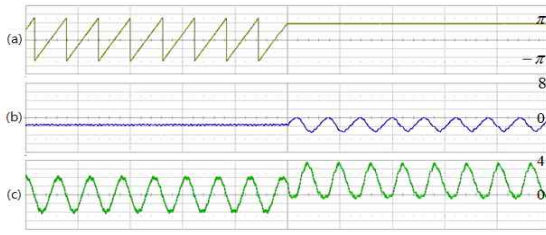


그림 7 위치센서의 출력 신호가 단선되었을 때의 실험 파형 (a) 회전자 위치[rad], (b) q축 전류[A], (c) 상 전류[A], [50ms/div.]

Fig. 7 Experimental waveforms when the output signal of position sensor is opened (a) rotor position, (b) q-axis current, (c) phase current

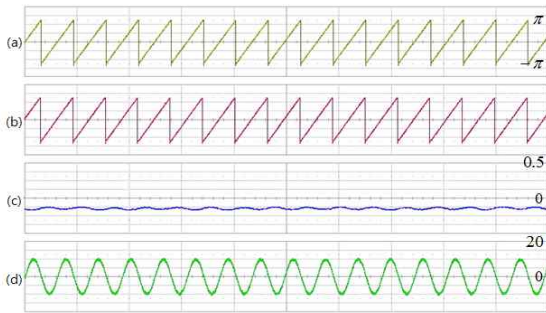


그림 8 센서리스 위치 추정 실험 파형 (a) 회전자 위치[rad], (b) 추정한 회전자 위치 [rad], (c) 위치 추정 오차[rad], (d) 상 전류[A], [50ms/div.]

Fig. 8 Experimental waveforms with sensorless position estimator (a) rotor position, (b) estimated rotor position, (c) position estimation error, (c) phase current

운터의 값이 단선 순간의 값을 유지하게 되고, 이로 인해 상 전류 및 q축 전류가 그림 7에 나타난 바와 같이 진동하게 되어 바람직하지 못한 토크 맥동을 발생 시킨다.

q축 전류 지령이 $-10[A]$ 일 때 영구자석 동기발전기를 통해 발전하는 전력은 $250[W]$ 정도이다. 실험에 사용한 전자 부하의 용량 제한($300[W]$)을 고려하여 q축 전류 지령이 $-10[A]$ 인 경우에 대해 실험을 진행하였다. 그림 8은 q축 전류 지령을 $-10[A]$ 로 설정하여 영구자석 동기발전기를 운전하고 있는 상태에서 엔코더를 통해 검출한 회전자 전기각과 확장 유기전력 기반의 센서리스 위치 추정기로 추정한 전기각을 비교한 실험 파형으로, 정상 상태에서 실제 회전자 전기각과 추정한 전기각 사이에는 $-0.125 [rad]$ 의 오차가 존재한

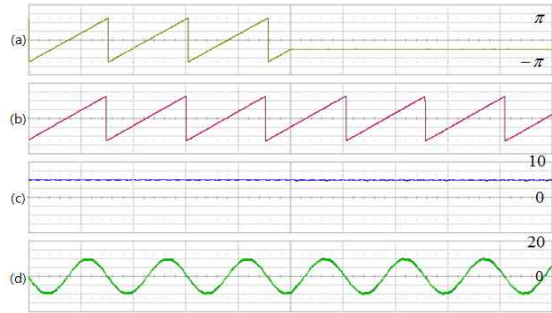


그림 9 위치센서 고장 회피 제어를 적용했을 때의 실험 파형. (a) 회전자 위치[rad], (b) 추정한 회전자 위치 [rad], (c) 추정 토크[Nm], (d) 상 전류[A], [20ms/div.]

Fig. 9 Experimental waveforms when the position sensor fault tolerant control is applied (a) rotor position, (b) estimated rotor position, (c) estimated torque, (d) phase current

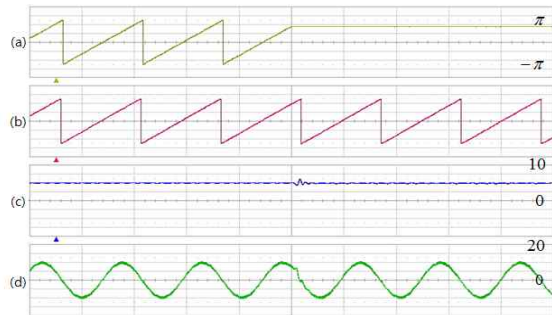


그림 10 위치센서 고장 회피 제어를 적용했을 때의 실험 파형. (a) 회전자 위치[rad], (b) 추정한 회전자 위치 [rad], (c) 추정 토크[Nm], (d) 상 전류[A], [20ms/div.]

Fig. 10 Experimental waveforms when the position sensor fault tolerant control is applied (a) rotor position, (b) estimated rotor position, (c) estimated torque, (d) phase current

다. 이것을 각도 단위로 환산하면 약 -7.1 도 정도의 추정 오차를 갖는 것으로 센서리스 위치 추정 성능은 비교적 만족스러운 것으로 볼 수 있다. 수식 (10)에서 언급한 바와 같이 센서리스 위치 추정을 위한 PI 제어기의 이득 설정을 위해 감쇠비(ξ)를 1, 고유주파수(ω_n)를 100으로 설정하였으며, 확장 유기전력 추정에 사용되는 필터의 대역폭(g_r)은 $600 [rad/sec]$ 로 설정하였다.

그림 9와 그림 10은 본 논문에서 제안한 위치센서 고장 회피 제어 알고리즘을 적용하고, q축 전류 지령을 $-10[A]$ 로 설정하여 영구자석 동기발전기를 운전자

고 있는 상태에서 엔코더 출력 신호를 단선했을 때의 실험 파형이다. 그림 9는 전류 제어 주기마다 엔코더 출력 펄스를 계수하는 카운터의 값을 이전 값과 비교하고, 카운터 값이 이전 값과 동일한 값을 가지는 경우 위치센서 고장으로 판별하고 즉시 센서리스 제어 모드로 전환한 경우이다. 추정 토크 및 상 전류 파형을 관찰해 보면 위치센서 고장 수간에 맥동없이 부드럽게 센서리스 제어 모드로 전환하고 있음을 확인할 수 있다. 그림 10은 엔코더를 통해 검출한 전기각과 추정된 전기각 오차의 절대 값이 30도를 벗어나면 위치센서 고장으로 판별하고 센서리스 제어 모드로 전환한 경우로, 그림 9와 비교해 보면 센서리스 제어 모드로 전환되기 직전에 추정 토크 및 상 전류 파형에 약간의 맥동이 발생함을 알 수 있다. 그림 9의 경우 전류 제어 주기로 위치 센서 고장 여부를 판별하였는데, 저속 운전 영역에서는 식 (11)의 조건을 만족하는 주파수로 위치 센서 고장 여부를 판별하여야 하므로 센서리스 모드로 전환되는 구간에서의 토크 맥동은 그림 9에 비해 다소 증가될 것으로 예상된다.

그림 9의 실험 상황은 기계적 및 전기적 원인으로 인해 엔코더가 파손되거나 신호선이 일부 또는 모두 단선된 경우로 볼 수 있다. 이러한 경우 기계적인 관성으로 인해 영구자석 동기발전기의 회전자는 계속 회전하고 있음에도 불구하고 엔코더 출력 펄스를 계수하는 카운터의 값은 기존의 값을 유지하므로 위치센서 고장으로 신속히 판정하여 센서리스 제어 모드로 전환할 수 있다.

엔코더와 회전자 사이의 기계적 결합이 느슨하게 되어 미끄러짐이 발생하는 경우에 대처하기 위해서는 그림 10에서의 실험과 같이 엔코더를 통해 검출한 전기각과 추정된 전기각 오차의 절대 값이 일정 값을 벗어나면 위치센서 고장으로 판별하고 센서리스 제어 모드로 전환해야 한다. 이러한 경우 엔코더 파손 및 신호선 단선에 의한 경우에 비해 위치센서 고장 여부 검출에 소요되는 시간이 길어지고, 이로 인해 과도 상태에서 전류 및 토크 맥동이 발생하게 되나 비교적 크기가 작기 때문에 영구자석 동기발전기의 연속 운전에 미치는 영향은 작을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 영구자석 동기발전기의 위치센서 고장을 판단하고, 위치센서 고장 상황에서는 센서리스 제어 모드로 전환함으로써 영구자석 동기발전기를 연속적으로 운전할 수 있는 위치센서 고장 회피 제어 알고리즘을 제안하였으며, 실험을 통해 그 동작 특성을

확인한 결과 위치센서 고장을 신속히 발견하고 센서리스 제어모드로 부드럽게 전환함을 확인하였다. 제안된 알고리즘은 영구자석 동기발전기의 전력변환 제어를 담당하는 컨버터에 사용되는 전압 및 전류 센서를 이용하므로 별도의 하드웨어 추가 비용이 발생하지 않으며, 영구자석 동기발전기를 사용하는 풍력발전 시스템에 적용하는 경우 시스템의 신뢰성 향상에 기여할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] 차인수, 김태형, 이기봉, “호남광역경제권의 서남해안 풍력산업 특성”, 전력전자학회 2010년도 하계학술대회 논문집, pp. 101-102, 2010. 7.
- [2] 윤동근, 강이규, 정해광, 이교범, “대용량 영구자석형 풍력발전시스템의 3병렬 운전을 위한 LCL필터 설계”, 전력전자학회 2009년도 하계학술대회 논문집, pp. 606-608, 2009. 7.
- [3] 장석호, 박홍극, 이동춘, 김홍근, “소형 풍력발전용 영구자석형 동기발전기의 센서리스 제어”, 전력전자학회 논문지, 제14권, 제1호, pp. 15-22, 2009.
- [4] S. Morimoto, K. Kawamotor, M. Sanada, and Y. Takeda, “Sensorless control strategy for salient-pole PMSM based on extended EMF in rotating reference frame”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 38, No. 4, pp. 1054-1061, 2002.
- [5] H. Kim, M.C. Harke, and R. D. Lorenz, “Sensorless control of interior permanent-magnet machine drives with zero-phase lag position estimation”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 39, No. 6, pp. 1726-1733, 2003.
- [6] S. Ichikawa, M. Tomita, S. Doki, and S. Okuma, “Sensorless control of synchronous reluctance motors based on extended EMF models considering magnetic saturation with online parameter identification”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 42., No. 5, pp. 1264-1274, 2006.
- [7] K. Rothenhagen, and F. W. Fuchs, “Doubly fed induction generator model-based sensor fault detection and control loop reconfiguration”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 56, No. 10, pp. 4229-4283, 2009.

저 자 소 개



이광운(李光雲)

1971년 1월 16일생. 1993년 고려대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2000년~2007년 삼성전자 생활가전총괄 책임연구원. 2007년~2008년 고려대 BK21 연구교수. 2008년~현재 목포해양대 해양전자통신공학부 조교수. 당 학회 편집위원.