

PMSG 적용 가변속 계통연계형 풍력발전 시스템의 통합 시뮬레이션 및 스위치 개방고장 진단기법 연구

(A Study on the Integrated Simulation and Condition Monitoring Scheme for a PMSG-Based Variable Speed Grid-Connected Wind Turbine System under Fault Conditions)

김경화* · 송화창 · 최병욱

(Kyeong-Hwa Kim · Hwa-Chang Song · Byoung-Wook Choi)

Abstract

To analyze influences under open fault conditions in switching devices, an integrated simulation and condition monitoring scheme for a permanent magnet synchronous generator (PMSG) based variable speed grid-connected wind turbine system are presented. Among various faults in power electronics components, the open fault in switching devices may arise when the switches are destructed by an accidental over current, or a fuse for short protection is blown out. Under such a faulty condition, the grid-side inverter as well as the generator-side converter does not operate normally, producing an increase of current harmonics, and a reduction in output and efficiency. As an effective way for a condition monitoring of generation system by online basis without requiring any diagnostic apparatus, the estimation schemes for generated voltage, flux linkage, and stator resistance are proposed and the validity of the proposed scheme is proved through comparative simulations.

Key Words : Condition Monitoring, Grid-Connected Wind Turbine, PMSG, Open Fault, Integrated Simulation

1. 서 론

세계적으로 화석에너지의 고갈에 대한 위기의식 및 국가 온실가스 배출 제한으로 인하여 신재생 에너지원에 대한 관심이 큰 폭으로 늘어나고 있다. 전기에너지의 형태로 전력망에 연계되어 운전되는 여러 신재생 에너지 자원 중 풍력발전은 가장 경제성이 큰 것으로 평가받고 있어 전 세계적으로 풍력발전 설비 용량은 큰 폭으로 증가하고 있으며 국내에서도 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1-4].

과거에는 유도발전기를 적용한 정속 구동형 풍력 터

* 주(교신)저자 : 서울과학기술대학교 전기정보공학과 부교수

* Main(Corresponding) author : Associate Professor, Dept. of Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology

Tel : 02-970-6406, Fax : 02-978-2754

E-mail : k2h1@seoultech.ac.kr

접수일자 : 2012년 12월 3일

1차심사 : 2012년 12월 5일

심사완료 : 2013년 1월 25일

빈이 많이 사용된 반면 근래에는 고효율 운전이 가능하고 기계적 스트레스를 줄일 수 있는 가변속 구동 방식이 주로 적용되고 있다. 가변속 구동 방식에서는 발전기와 계통 사이에 컨버터와 인버터로 구성되는 Back-to-Back 컨버터를 두어 발전기의 가변 출력 전압 및 주파수를 계통의 전압 및 주파수로 변환하게 된다[5-6]. Back-to-Back 컨버터 기반의 가변속 풍력 발전에 사용되는 영구자석 동기발전기(Permanent Magnet Synchronous Generator; PMSG)는 별도의 계자회로가 필요하지 않아 계자 손실이 없고 구조가 간단하며 고효율 및 넓은 운전 범위 등의 장점을 갖는다. 게다가 소음과 신뢰성 저하의 주요인인 증속기를 제거한 직접구동 방식이 가능하여 PMSG 적용 가변속 계통연계형 풍력발전 시스템에 대한 연구가 집중되고 있다[6-8]. 이와 더불어 최근의 풍력발전 시스템 연구는 전력변환장치 및 제어이론을 결합한 출력최대화 기법, 피치 제어, 계통연계 기법 및 그리드 코드 대응운전 등 단위 풍력발전기가 갖추어야 하는 기능을 포함시키는 연구가 적극적으로 진행되고 있다[9].

과거에는 독립형 혹은 소량의 풍력발전 시스템이 기존 전력망에 연계되어 운영된 반면 근래에는 풍력발전 설비가 대용량화 되고 대규모 풍력단지를 조성하는 사례가 점차 늘고 있어 풍력발전 설비가 전체 전력망에 차지하는 비중이 점차 증대되고 있다. 따라서 풍력발전 시스템의 신뢰성과 효율 향상을 통해 계통으로 안정적으로 전원을 공급하여 전력망 운용에 안정성을 향상시키는 문제가 주요 이슈가 되고 있다. 이를 위해 내부 고장진단과 상태감시(Condition Monitoring) 등 진보된 유지/보수 기법에 대한 연구 및 이를 적용한 차세대 풍력발전 시스템 연구가 시도되고 있다[10-11]. 대규모 풍력단지가 해안이나 벽지에 조성되어 점검이나 복구에 많은 시간과 비용이 발생한다는 점을 고려하면 이러한 연구의 필요성은 더 증대되어 진다.

일반적으로 고장의 진단과 대응체계는 상태감시(Condition monitoring), 고장진단(Fault diagnosis), 고장대응(Fault-tolerant operation), 고장예측(Fault prediction) 및 고장회피(Fault avoidance)의 5가지

체계로 연구가 수행되고 있으며, 초기단계에서 고장을 검출함으로써 인접 시스템으로의 고장의 전파/확대를 차단하고 복구비용을 최소화하기 위해서는 상태감시나 고장진단 기법이 더욱더 중요한 역할을 하게 된다.

최근 수행된 연구에서 풍력발전 시스템에 대한 평균 고장분석 결과가 자세히 제시되어 있으며[12], 결과에 의하면 풍력터빈의 고장은 베어링, 발전기, 편심 및 배전계통에서 주로 일어나게 되며 배전계통의 고장은 Back-to-Back 컨버터 등 전력변환장치에서 50%, 그 외 구성품의 고장이 50%를 차지한다. 전력변환장치 사용의 증가로 인해 전기적 고장은 확대 추세이며 풍력단지가 해안이나 벽지에 존재하여 복구에 많은 시간이 소요되는 점과 풍력발전이 전체 전력망에 차지하는 비중이 점차 증대되는 점이 함께 고려되어야 한다.

최근에는 전력변환장치의 고장대응 운전을 위한 모듈형 장치에 대한 연구도 도입되고 있다[13]. 일부 연구에서 진동 센서나 가속 센서를 활용한 센서 네트워크 기반의 상태감시 체계를 구축하였으나 주로 터빈 질량 불균형, 샤프트 및 베어링 손상과 같은 드라이브 트레인에 대한 상태감시를 다루며 발전기 및 전력변환장치 등 전기적 구성체의 내부 고장진단과 대응에는 미흡한 실정이다[10].

PMSG나 인버터와 같은 단일 전력변환장치 유닛에 대한 고장진단 기법이 일부 연구되기는 하였으나[14-18], 풍력 터빈에 직결된 환경에서의 PMSG 및 전기적 구성체에 대한 고장진단에 대한 결과는 매우 부족하며, 또한 센서 네트워크 등 부가적인 진단장비 없이 On-line 방식으로 시스템 운영 중에 제어가 풍력발전 시스템의 고장을 진단할 수 있는 기법에 대한 연구가 더욱 요구되어진다. 가변속 풍력터빈은 기계적, 환경적 스트레스가 극심한 시스템으로 작은 고장이 인접 시스템으로 지속적으로 확대하는 양상을 가진다. 극단적인 상태에서는 시스템의 복구를 위해 막대한 비용이 소요되는 반면 고장이 초기단계에서 발견된다면 복구를 위한 손실을 최소화할 수 있으므로 반드시 초기단계에서 고장이 검출되어야 한다.

본 논문에서는 PMSG 적용 가변속 계통연계형 풍력발전 시스템의 통합 시뮬레이션 연구를 통해 스위칭 소자에 개방고장이 발생한 경우의 모델 및 응답특성이 제시되고 이를 검출할 수 있는 상태감시 기법이 제안된다. 전력변환장치의 여러 고장원인 중 스위칭 소자의 고장은 과전류에 의해 소손이 발생하거나 보호회로에 의한 강제 단선 등으로 인해 발생하는 고장이다. 발전기측 컨버터의 스위칭 소자에 고장이 발생할 경우 제어기에서 계산된 정확한 3상전압을 합성할 수 없으며, 전류의 고조파 성분이 증가하고 발전 전력의 저하를 일으킨다. 이러한 고장을 감지하고 시스템의 정상동작 여부를 모니터링하기 위해 3가지 파라미터의 관측 기법을 제안한다. PMSG의 무부하 발전전압, 쇄교자속 및 고정자 저항 값이 관측기 혹은 적응제어 방식으로 추정되고 이들 파라미터의 모니터링을 통해 전력변환장치에서 스위치의 개방고장을 효과적으로 검출할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 입증한다.

2. 풍력발전시스템 모델

Back-to-Back 컨버터와 PMSG를 채용한 풍력발전 시스템의 전체 구성은 그림 1과 같다. 바람의 운동에너지는 풍력터빈의 블레이드에 의해 기계적 토크를 발생시키며, 이는 PMSG와 Back-to-Back 컨버터를 통해 전기적 에너지로 변환되어 계통에 공급된다. 이

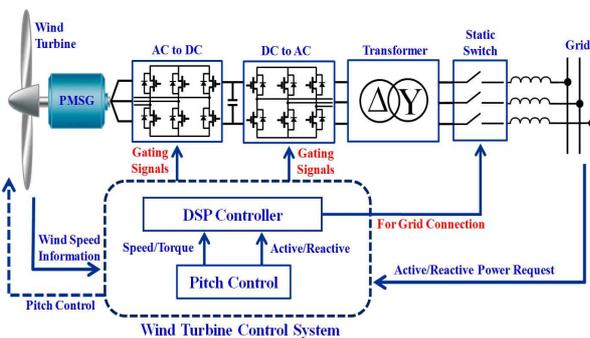


그림 1. 가변속 계통연계형 풍력발전시스템의 구성
Fig. 1. Configuration of grid-connected wind power generation

때 발전기측 컨버터에서는 최대 출력을 얻기 위한 발전기의 속도 제어가 이루어지며, 계통측 인버터에서는 계통연계를 위한 주파수 변환과 유/무효 전력제어가 이루어지게 된다.

블레이드는 바람의 운동에너지를 기계적 회전에너지로 변환하는 역할을 한다. 풍속 V_{wind} m/s인 바람이 회전자 반경 R_b m인 블레이드 회전 단면을 통과할 때 가지는 에너지는 식 (1)과 같다.

$$P_{wind} = 0.5A\rho V_{wind}^3 W \quad (1)$$

여기서 $A = \pi R_b^2$ 는 블레이드의 회전 단면적 m^2 이며, ρ 는 공기 밀도 kg/m^3 이다. 풍력터빈의 블레이드에 의해 P_{wind} 로부터 변환되는 기계적 에너지는 블레이드의 출력계수를 곱하여 식 (2)와 같이 구해진다.

$$P_b = 0.5A\rho V_{wind}^3 C_p(\lambda, \beta) W \quad (2)$$

여기서 C_p 는 블레이드의 출력계수, β 는 피치각, λ 는 주속비를 나타낸다. 주속비 λ 는 풍속과 블레이드의 회전속도를 이용하여 식 (3)과 같이 나타낸다.

$$\lambda = \frac{\omega_b R_b}{V_{wind}} \quad (3)$$

여기서 ω_b 는 블레이드의 회전 각속도이다. 출력계수 C_p 는 블레이드의 특성 계수로서 주속비와 피치각에 따라 다음과 같이 나타낸다[19].

$$C_p = c_1 \cdot (c_2 - c_3\beta - c_4\beta^x - c_5) \cdot e^{-c_6} \quad (4)$$

일반적으로 출력계수 C_p 는 주속비 λ 를 λ_{opt} 값으로 유지할 때 최대값 $C_{p,max}$ 를 갖는다. 출력계수가 최대값일 때 풍력터빈에 의해 포획되는 최대 전력은 식 (5)와 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} P_{b,max} &= 0.5A\rho C_{p,max} V_{wind}^3 \\ &= 0.5A\rho C_{p,max} \left(\frac{\omega_b R_b}{\lambda}\right)^3 \end{aligned} \quad (5)$$

블레이드의 출력은 PMSG에 토크 형태로 전달되며, 발전기에 전달되는 토크 T_b 는 식 (6)과 같다.

$$T_b = P_b / \omega_b \quad (6)$$

3. PMSG 기반 가변속 계통연계형 풍력발전시스템

동기좌표계 상에서 PMSG의 고정자 전압 방정식은 다음과 같이 나타난다[20].

$$e_{qem} = (R_s + pL_q)i_{qem} + \omega_r L_d i_{dem} + v_{qem} \quad (7)$$

$$e_{dem} = (R_s + pL_d)i_{dem} - \omega_r L_q i_{qem} + v_{dem} \quad (8)$$

여기서 첨자 “m”은 발전기와 발전기측 컨버터 변수를 나타내며, v_{qem} , v_{dem} 은 각각 q축, d축 컨버터 입력 전압, i_{qem} , i_{dem} 은 각각 q축, d축 전류, R_s 는 고정자 저항, L_q , L_d 는 각각 q축, d축 인덕턴스, ω_r 은 전기 각속도, p 는 미분연산자이다. 동기좌표계 상에서 전원전압을 q축에 일치시키면 $e_{qem} = \omega_r \lambda_m$, $e_{dem} = 0$ 이 되며, 이때 λ_m 은 쇄교 자속을 나타낸다[21].

증속기어의 증속비가 N 일 때 PMSG에 전달되는 블레이드 토크 $T_m = T_b / N$ 이며, T_m 과 PMSG의 전기자 기적 토크 T_e 는 다음 식과 같이 나타난다.

$$T_m = Jp\omega_m + B\omega_m + T_e \quad (9)$$

$$T_e = 1.5n_p \{ (L_d - L_q)i_{dem}i_{qem} + \lambda_m i_{qem} \} \quad (10)$$

여기서 J 는 풍력터빈과 발전기의 등가 관성, B 는 마찰계수, n_p 는 자극 쌍의 수, ω_m 은 기계 각속도로 $\omega_m = N\omega_b = \omega_r / n_p$ 가 된다.

풍력발전 시스템의 발전기측 컨버터는 출력계수 C_p 가 최대값을 가지기 위해 주속비를 λ_{opt} 값으로 유지하도록 제어된다[22]. 주속비가 λ_{opt} 로 제어될 때 블레이드의 기계적 출력은 식 (11)과 같다.

$$P_{b,max} = K_b \omega_b^3 \quad (11)$$

여기서 $K_b = 0.5A\rho C_{p,max} (R_b / \lambda_{opt})^3$ 이다. 식 (6)으로부터 블레이드에서 PMSG에 공급하는 토크와 q축 전류 명령은 다음 식과 같이 구해진다.

$$T_b^* = K_b \omega_b^2 \quad (12)$$

$$i_{qem}^* = T_m^* / K_t = T_b^* / (NK_t) \quad (13)$$

여기서 “*”는 명령 값을 나타내며, $K_t = 1.5n_p \lambda_m$ 으로 PMSG의 토크 상수이다.

PMSG의 속도 및 토크 제어는 발전기측 컨버터의 전류 제어에 의해 이루어진다. 식 (13)의 q축 전류 명령과 단위역률을 위한 d축 전류 명령 $i_{dem}^* = 0$ 을 이용해 전류 제어기는 동기좌표계 상에서 이루어진다. PI 제어기와 간섭항 보상을 위한 비결합 항을 이용하여 전압 명령은 다음과 같이 계산된다.

$$v_{qem}^* = - (k_{pm} + \frac{k_{im}}{s})(i_{qem}^* - i_{qem}) - \omega_r L_d i_{dem} + e_{qem} \quad (14)$$

$$v_{dem}^* = - (k_{pm} + \frac{k_{im}}{s})(i_{dem}^* - i_{dem}) + \omega_r L_q i_{qem} \quad (15)$$

여기서 k_{pm} 과 k_{im} 은 각각 전류 제어기의 비례 및 적분 이득, s 는 라플라스 연산자이다. 식 (14)~(15)가 PMSG의 전압 방정식 (7)~(8)에 인가될 때 q축 전류 전달함수를 식 (16)과 같이 구할 수 있다.

$$T(s) = \frac{I_{qem}(s)}{I_{qem}^*(s)} = \frac{k_{pm}s + k_{im}}{L_q s^2 + (R_s + k_{pm})s + k_{im}} \quad (16)$$

제어기 대역폭 ω_B 는 2차 전달함수의 경우 대략적으로 감쇄율 ξ 와 고유 주파수 ω_n 의 함수로 식 (17)과 같이 구해질 수 있다[23].

$$\omega_B = (-1.196\xi + 1.85)\omega_n \text{ for } 0.3 \leq \xi \leq 0.8 \quad (17)$$

식 (16)을 이용하여 전류제어기의 주파수 대역폭이 설정될 수 있으며, d축 전류에 대해서도 유사하게 전달함수와 대역폭이 설정된다. 발전기측 컨버터에서

전류의 q축과 d축 성분은 각각 발전기의 토크와 역률 제어를 담당하게 되며, 구해진 전압명령은 공간벡터 PWM 기법에 의해 인가된다[24].

Back-to-Back 컨버터 기반의 가변속 풍력발전 시스템에서 계통측 인버터는 발전전력을 계통으로 전달하고 출력전류를 계통전압과 동위상의 정현파로 제어함으로써 3상 계통으로 단위역률을 지니는 전력을 전달하는 기능을 한다. 직류단 입력전력이 계통출력 전력보다 클 경우 직류단 전압은 상승하게 되고, 반대의 경우는 직류단 전압이 감소하게 된다. 계통측 인버터는 직류단 전압을 일정하게 제어함으로써 발전기측 컨버터에서 직류단으로 입력되는 전력을 계통으로 전달하는 역할을 한다[22]. 계통으로 출력되는 유효전력과 무효전력은 식 (18) 및 (19)와 같다.

$$P = 1.5(e_{qcg}i_{qcg} + e_{deg}i_{deg}) \quad (18)$$

$$Q = 1.5(e_{qcg}i_{deg} - e_{deg}i_{qcg}) \quad (19)$$

여기서 첨자 “g”는 계통과 계통측 인버터 변수를 나타내며 e_{qcg} , e_{deg} 는 각각 계통의 q축, d축 전압, i_{qcg} , i_{deg} 은 각각 q축, d축 전류이다. $e_{qcg} = E$ 및 $e_{deg} = 0$ 일 때 무효전력이 영이되기 위해 d축 전류 i_{deg} 를 영으로 제어하므로 계통으로 출력되는 유효전력 $P = 1.5Ei_{qcg}$ 가 된다.

계통측 인버터는 직류단 전압을 제어하기 위한 외부의 전압제어기와 내부의 전류제어기로 구성된다. PI 제어기를 이용하여 전압 제어기는 다음과 같이 구성된다.

$$i_{qcg}^* = -(k_{pv} + k_{iv}/s)(V_{DC}^* - V_{DC}) \quad (20)$$

여기서 V_{DC} 는 직류단 전압이다. 전류 제어기는 식 (20)과 $i_{deg}^* = 0$ 의 전류 명령을 이용하여 동기좌표계 상에서 이루어지며, 다음과 같이 PI 비결합 제어를 통해 수행된다.

$$v_{qcg}^* = (k_{pg} + k_{ig}/s)(i_{qcg}^* - i_{qcg}) + \omega_e L_s i_{deg} + e_{qcg} \quad (21)$$

$$v_{deg}^* = (k_{pg} + k_{ig}/s)(i_{deg}^* - i_{deg}) - \omega_e L_s i_{qcg} + e_{deg} \quad (22)$$

여기서 ω_e 는 계통전압의 각속도이다.

4. PMSG 기반 가변속 풍력발전시스템의 고장 모델 및 진단 기법

스위칭 소자에 개방고장이 발생할 경우 3상평형 조건이 유지되지 않아 상전압 모델 혹은 d-q좌표계 모델로는 컨버터의 입력전압을 구하는 것이 어렵다. 따라서 이러한 고장을 해석하기 위해서는 선간전압을 이용한 모델을 사용하여야 한다. 고장이 발생하지 않은 정상 조건에서 PMSG의 동적 모델은 3상변수를 이용하여 식 (23)과 같이 구해진다[20].

$$\begin{pmatrix} e_{asm} \\ e_{bsm} \\ e_{csm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s + pL & pM & pM \\ pM & R_s + pL & pM \\ pM & pM & R_s + pL \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{asm} \\ i_{bsm} \\ i_{csm} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_{asm} \\ v_{bsm} \\ v_{csm} \end{pmatrix} \quad (23)$$

여기서 R_s 는 상저항, L 은 자기 인덕턴스, M 은 상호 인덕턴스, v_{asm} , v_{bsm} 및 v_{csm} 는 각각 컨버터 입력 상전압, i_{asm} , i_{bsm} 및 i_{csm} 는 각각 상전류, e_{asm} , e_{bsm} , 및 e_{csm} 는 각각 PMSG의 3상 발전 전압으로 다음과 같이 나타난다.

$$e_{asm} = \omega_r \lambda_m \cos \theta_r \quad (24)$$

$$e_{bsm} = \omega_r \lambda_m \cos(\theta_r - 2\pi/3) \quad (25)$$

$$e_{csm} = \omega_r \lambda_m \cos(\theta_r + 2\pi/3) \quad (26)$$

여기서 θ_r 은 전기각을 나타내며 상변수를 이용한 전자기적 토크 및 부하와 전기각의 관계는 다음과 같이 나타난다.

$$T_m = Jp\omega_m + B\omega_m + \frac{e_{asm}i_{asm} + e_{bsm}i_{bsm} + e_{csm}i_{csm}}{\omega_m} \quad (27)$$

$$\dot{\theta}_r = \omega_r \quad (28)$$

그림 2는 PMSG와 3상 PWM 컨버터를 나타낸다. 극전압 v_{ao} , v_{bo} , v_{co} 는 직류단 “o”에 대한 PMSG의 터미널 전압으로 정의된다. a상의 극전압은 스위치와 다이오드의 도통 상태에 따라 다음과 같이 구해진다.

$$v_{ao} = V_{DC} \text{ for } T_{a+} \text{ or } D_{a+} \text{ on}$$

$$v_{ao} = 0 \text{ for } T_{a-} \text{ or } D_{a-} \text{ on}$$

상전압은 PMSG의 중성점 “s”에 대한 터미널 전압 v_{asm} , v_{bsm} 및 v_{csm} 으로 선전압, 상전압 및 극전압의 관계식은 다음과 같이 구해진다.

$$v_{ab} = v_{asm} - v_{bsm} = v_{ao} - v_{bo} \tag{29}$$

$$v_{bc} = v_{bsm} - v_{csm} = v_{bo} - v_{co} \tag{30}$$

$$v_{ca} = v_{csm} - v_{asm} = v_{co} - v_{ao} \tag{31}$$

정상운전 상태에서는 3상평형 조건이 성립하므로 3상 컨버터의 스위칭 상태에 따라 극전압을 이용하여 쉽게 발전기의 상전압 입력을 구할 수 있다. 하지만 스위치 개방고장 시에는 3상평형 조건이 성립하지 않고 상전압 입력을 구하기가 쉽지 않기 때문에 극전압 정보로부터 쉽게 구해지는 선전압 모델을 사용하여야 한다. 식 (29)~(31)을 이용하여 고장이 없는 정상운전 조건에서의 발전기와 컨버터 모델식 (23)은 다음과 같이 나타난다.

$$-p(L-M)i_{asm} + p(L-M)i_{bsm}$$

$$= v_{ab} - e_{asm} + e_{bsm} + R_s i_{asm} - R_s i_{bsm} \tag{32}$$

$$-p(L-M)i_{asm} - 2p(L-M)i_{bsm}$$

$$= v_{bc} - e_{bsm} + e_{csm} + R_s i_{asm} + 2R_s i_{bsm} \tag{33}$$

식 (27)~(28) 및 식 (32)~(33)을 이용하여 개방고장이 없는 정상조건에서의 특성을 구할 수 있다.

풍력발전 시스템에서 3상 컨버터의 개방고장으로 인한 고장모델을 유도하기 위해 우선 그림 2에서 T_{a+} 와 T_{a-} 전체가 개방되어 a상 Arm 전체에 개방고장이

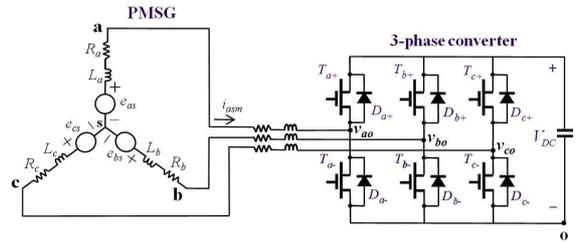


그림 2. 3상 PWM 컨버터
Fig. 2. Three-phase PWM converter

일어나는 경우를 고려한다. 이 경우 발전기 a상은 컨버터와 완전히 분리되고 직류단으로 전력을 공급할 수 없다. 과전류로 인해 스위치 전체가 소손되거나 소자 보호를 위한 퓨즈 용해에 의해 이러한 고장이 발생하게 된다. 이 때, a상전류는 영으로 유지되며 발전전력은 2상을 통해서만 직류단에 전달된다. 즉 $i_{asm} = 0$ 인 Y결선에서 $i_{bsm} + i_{csm} = 0$ 및 $i_{bsm} = -i_{csm}$ 이 성립된다. 또한 식 (23)으로부터 $v_{asm} = e_{asm}$ 이 된다. 개방된 상의 전류가 영이므로 개방되지 않은 두 상전류를 이용하여 미분 방정식을 수립할 수 있으며, 정상인 경우에 비해 미분 방정식 차수가 감소하게 된다. 상전압 v_{bsm} 과 v_{csm} 으로부터 선전압 관계식을 구하면 v_{bc} 는 다음과 같다.

$$v_{bc} = -2p(L-M)i_{bsm} - 2R_s i_{bsm} + e_{bsm} - e_{csm} \tag{34}$$

식 (27)~(28)과 식 (34)를 이용하여 a상 Arm 전체 스위치에 개방고장이 발생한 경우의 고장모델이 구해지며 이를 이용하여 응답특성이 해석될 수 있다. 표 1은 3상 컨버터의 각 Arm 스위치 모두에 개방고장이 발생할 때의 고장 전압 모델을 나타낸다.

다음으로 그림 2의 3상 컨버터 6개 스위치 중 하나에서 개방고장이 일어나는 경우를 고려한다. a상의 상단 스위치인 T_{a+} 에 개방고장이 일어나면 T_{a+} 가 도통할 수 없어 그림 3 (a)의 전압 공간벡터 중 V_1 , V_3 , V_5 및 V_7 벡터를 발생할 수 없다. 섹터 1, 2, 5, 및 6이 T_{a+} 가 도통되어야 하는 전압벡터를 사용하므로 이 구간에서 컨버터는 기준전압과 같은 전압을 합성할 수 없게 된다. 섹터 3과 4에서는 인접 전압벡터가 T_{a+} 의 도

통을 필요로 하지는 않지만 그림 3 (b)에서와 같은 영 벡터 V_7 을 발생할 수 없게 된다. T_{a+} 에만 개방고장이 발생한 경우 V_0, V_2, V_4 및 V_6 벡터에서 a상 극전압 v_{ao} 는 T_{a-} 의 도통으로 $v_{ao} = 0$ 이 되나 V_1, V_3, V_5 및 V_7 벡터에서는 v_{ao} 는 v_{bo}, v_{bsm} , 및 v_{asm} 에 의해 결정되는 순간 과도전압을 가지며 정상상태에서는 0이 된다.

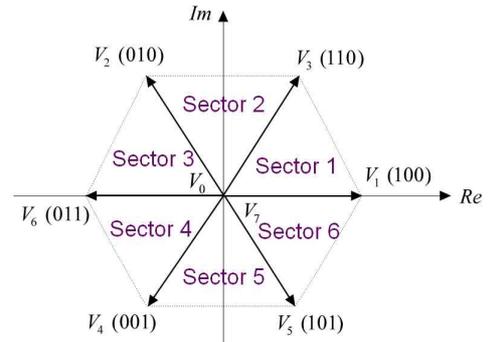
PMSG와 Back-to-Back 컨버터 기반의 가변속 풍력발전 시스템에서 3상 컨버터에 스위치 개방고장이 발생하면 풍력터빈의 출력계수를 최대로 유지하도록 주속비를 제어할 수 없게 된다. 그 결과로 최대 발전 전력을 얻을 수 없으며, 전류제어를 통해 단위역률을 얻는 것도 불가능 해진다. 따라서 발전기 및 전력변환 장치의 이상 유무를 감지하여 발전시스템의 신뢰성과 효율을 향상시킬 수 있는 정확한 고장 진단 혹은 상태 감시 기법이 요구되어진다.

본 논문에서는 Back-to-Back 컨버터를 구성하는 3상 컨버터에 스위치 개방고장이 발생 시 이를 감지하고 정상동작 여부를 모니터링할 수 있는 3가지 파라미터 관측기법을 제안한다. 3상 컨버터가 PMSG와 연계되어 운전되고 있는 점을 고려하여 PMSG의 무부하 발전전압, 쇄교자속, 및 고정자 저항 값을 관측기 혹은 적응 제어 방식으로 추정하고 이들 파라미터의 모니터링을 통해 3상 컨버터의 이상 유무 혹은 스위치 개방고장을 검출할 수 있음을 입증한다.

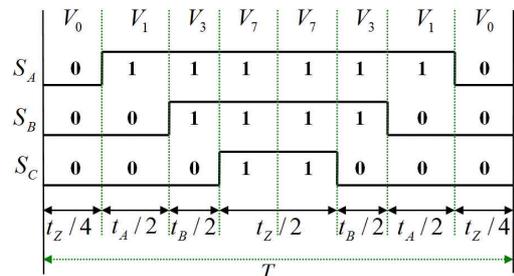
우선 PMSG의 q축 무부하 발전전압 $e_{qem} = \omega_r \lambda_m$ 이 외란 관측기에 의해 추정된다. 식 (7)의 e_{qem} 은 상태변수는 아니지만 기존의 관측기 이론이 확장된 외란 관측기에 의해 쉽게 추정될 수 있다. 관측기가 e_{qem} 의 변화보다 충분히 더 빠른 동적특성을 가지는 가정 하에 전류제어 주기 내에서 $\dot{e}_{qem} = 0$ 이 성립한다[25]. 식 (7)과 이를 이용하여 다음의 상태 방정식을 구할 수 있다.

$$p \begin{pmatrix} i_{qem} \\ e_{qem} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -R_s/L_q & 1/L_q \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_{qem} \\ e_{qem} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1/L_q \\ 0 \end{pmatrix} v_{qem} + \begin{pmatrix} -\omega_r(L_d/L_q)i_{dem} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (35)$$

시스템이 가관측하므로 식 (35)의 전 상태를 관측할 수 있다. 연산량을 줄이기 위해 식 (35)에 축소차수 관



(a) 섹터와 공간전압벡터



(b) 대칭 공간벡터 PWM

그림 3. 대칭 공간벡터 PWM의 스위칭 패턴

Fig. 3. Switching pattern in symmetrical SVPWM

표 1. 컨버터 Arm 전체 스위치 개방고장 시 전압모델
Table 1. Voltage model under open fault in total switch of converter arm

고장 상	전압 모델
a상	$i_{asm} = 0, v_{asm} = e_{asm}$ $i_{bsm} + i_{csm} = 0, \dot{i}_{bsm} = -\dot{i}_{csm}$ $v_{bc} = -2p(L-M)i_{bsm} - 2R_s i_{bsm} + e_{bsm} - e_{csm}$
b상	$\dot{i}_{bsm} = 0, v_{bsm} = e_{bsm}$ $i_{asm} + i_{csm} = 0, \dot{i}_{asm} = -\dot{i}_{csm}$ $v_{ca} = -2p(L-M)i_{csm} - 2R_s i_{csm} + e_{csm} - e_{asm}$
c상	$\dot{i}_{csm} = 0, v_{csm} = e_{csm}$ $i_{asm} + i_{bsm} = 0, \dot{i}_{asm} = -\dot{i}_{bsm}$ $v_{ab} = -2p(L-M)i_{asm} - 2R_s i_{asm} + e_{asm} - e_{bsm}$

측기를 적용하면 무부하 발전전압의 추정치 \hat{e}_{qem} 를 구하는 것이 가능하다.

스위치 개방고장 발생을 감지하고 정상동작 여부를 모니터링 및 상태감시에 활용하기 위해 쇄교자속을

추정할 수 있다. 외란 관측기가 λ_m 의 변화보다 충분히 더 빠른 동적특성을 가지는 경우 전류제어 주기 내에서 $\dot{\lambda}_m=0$ 이 역시 성립한다. 이 관계식과 식 (7) 및 $e_{qem} = \omega_r \lambda_m$ 을 이용하여 다음의 상태 방정식을 구할 수 있다.

$$p \begin{pmatrix} i_{qem} \\ \lambda_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -R_s/L_q & \omega_r/L_q \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_{qem} \\ \lambda_m \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1/L_q \\ 0 \end{pmatrix} v_{qem} + \begin{pmatrix} -\omega_r(L_d/L_q)i_{dem} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (36)$$

식 (36)의 시스템 역시 가관측하므로 전 상태를 관측하는 것이 가능하다. 식 (36)에 축소차수 관측기를 적용함으로써 쇠교자속의 추정치 $\hat{\lambda}_m$ 을 구할 수 있다.

3상 컨버터와 PMSG의 이상 유무를 검출하거나 상태감시를 위해 고정자 저항 값이 사용될 수 있다. 고정자 저항은 모델기준 적응제어 기법의 hyperstability 개념을 이용하여 추정된다[26]. 이를 위해 식 (7)~(8)을 상태 방정식으로 다음과 같이 표현한다.

$$p \mathbf{i}_s = \mathbf{A} \mathbf{i}_s + \mathbf{B} \mathbf{v}_s + \mathbf{d}$$

$$p \begin{pmatrix} i_{qem} \\ i_{dem} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -R_s/L_q & -\omega_r L_d/L_q \\ \omega_r L_q/L_d & -R_s/L_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{qem} \\ i_{dem} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -1/L_q & 0 \\ 0 & -1/L_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{qem} \\ v_{dem} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_{qem}/L_q \\ e_{dem}/L_d \end{pmatrix} \quad (37)$$

식 (37)을 추정하는 전 상태 관측기의 구성은 다음과 같다.

$$p \hat{\mathbf{i}}_s = \hat{\mathbf{A}} \hat{\mathbf{i}}_s + \mathbf{B} \mathbf{v}_s + \mathbf{d} + \mathbf{G}(\hat{\mathbf{i}}_s - \mathbf{i}_s) \quad (38)$$

$$\hat{\mathbf{A}} = \begin{pmatrix} -\hat{R}_s/L_q & -\omega_r L_d/L_q \\ \omega_r L_q/L_d & -\hat{R}_s/L_d \end{pmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{pmatrix}$$

또한 “ $\hat{\cdot}$ ”은 추정치를 나타낸다. 전류와 전류의 추정치 오차를 $\mathbf{e} = \mathbf{i}_s - \hat{\mathbf{i}}_s$ 으로 정의하면 식 (37)과 (38)로부터 다음의 오차 동특성을 구할 수 있다.

$$\dot{\mathbf{e}} = (\mathbf{A} + \mathbf{G})\mathbf{e} - \mathbf{W} \quad (39)$$

$$\text{여기서 } \mathbf{W} = -(\mathbf{A} - \hat{\mathbf{A}})\hat{\mathbf{i}}_s = -\Delta R_s \mathbf{B} \hat{\mathbf{i}}_s, \quad \Delta R_s = R_s - \hat{R}_s$$

식 (39)의 오차 동특성으로부터 다음과 같은 적응제어 문제를 정의할 수 있다.

$$\hat{R}_s(e, t) = \int_0^t \Phi_1 d\tau + \Phi_2 + \hat{R}_s(0) \quad (40)$$

여기서 Φ_1 과 Φ_2 는 R_s 의 추정을 위한 적응제어 방법을 나타낸다. 점근 안정성을 위한 적응 제어 설계 문제는 다음과 같이 요약된다[26].

1. 초기조건 $\mathbf{e}(0)$ 와 $\Delta R_s(0)$ 에 대해 $\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{e}(t) = 0$ 이 되도록 하는 Φ_1 과 Φ_2 를 결정한다.
2. $\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{R}_s = R_s$ 를 만족하도록 한다.

행렬 $(\mathbf{A} + \mathbf{G})$ 가 strictly positive real 조건을 만족하고 \mathbf{W} 가 Popov 적분 부등식을 만족하게 되면 시스템이 안정성이 입증되며 이를 만족하도록 하는 R_s 의 추정치는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{R}_s = (k_{PR} + k_{IR}/s) \cdot (\mathbf{e}^T \mathbf{B} \hat{\mathbf{i}}_s) + \hat{R}_s(0) \quad (41)$$

여기서 k_{PR} 과 k_{IR} 은 각각 R_s 의 추정을 위한 비례 및 적분 이득이다.

5. 시뮬레이션 결과

이 절에서는 PMSG 적용 가변속 계통연계형 풍력발전 시스템의 통합 시뮬레이션 연구를 통해 스위치 개방고장 시의 응답특성을 분석하고 고장진단과 상태감시를 위해 3개 파라미터의 추정이 효과적으로 사용될 수 있음이 비교 시뮬레이션을 통해 입증된다.

전체 시뮬레이션은 PSIM을 이용하였으며 제어기는 PSIM의 DLL 블록에 의해 구현된다. 그림 4는 PSIM으로 구현한 계통연계형 풍력발전 시스템의 통합 시뮬레이션 구조를 나타낸다. 전체 시스템은 풍력터빈, PMSG, 발전기측 컨버터, 계통측 인버터 및 제어기 구현을 위한 DLL 블록으로 구성되며, 컨버터와 인버터

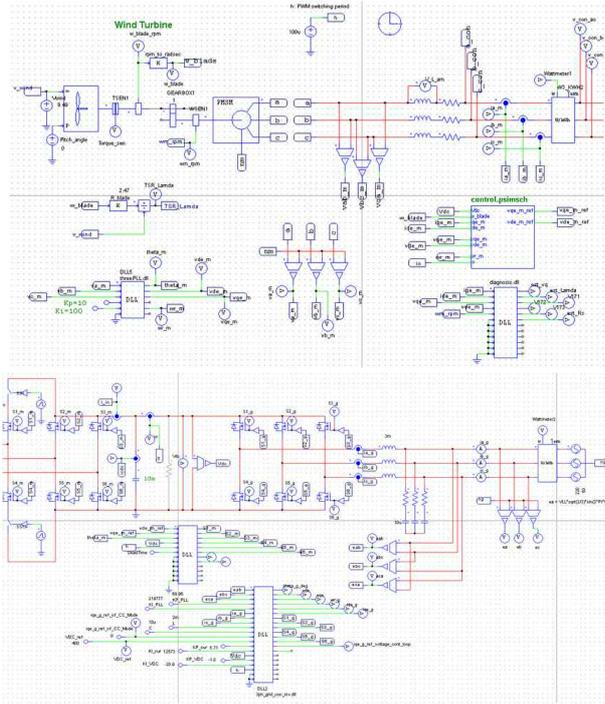


그림 4. 계통연계형 풍력발전 시스템의 시뮬레이션 구조
 Fig. 4. Configuration of simulation for a PMSG-based variable speed grid-connected wind turbine system

표 2. 풍력터빈 및 PMSG 파라미터
 Table 2. Parameters of wind turbine blade and PMSG

풍력터빈 정격용량	5kW
풍력터빈 정격풍속	9.5m/sec
풍력터빈 정격속도	300rpm
풍력터빈 블레이드 반경	2.5m
PMSG 정격용량	5kW
PMSG 정격속도	300rpm
PMSG 극수	24
PMSG 쇄교자속	0.36Wb
PMSG 고정자 저항	0.64Ω
PMSG d축 인덕턴스	0.82mH
PMSG q축 인덕턴스	0.82mH

의 전류제어를 위해서는 동기좌표계 PI 비결합 전류 제어가 사용된다. 샘플링 시간은 100μsec로 설정되며 전압명령 인가를 위해 공간벡터 PWM 기법이 사용된

다. 풍력터빈으로 PSIM 모델블록이 사용되며 이 모델은 $\lambda_{opt}=8.18$ 일 때 $C_{p,max}=0.49$ 를 갖는다. 시뮬레이션에서는 과도현상을 관찰할 목적으로 계산 시간을 줄이기 위해 터빈의 관성을 다소 작게 설정한 것을 제외하고는 모두 실제 파라미터를 사용하였으며, 풍력터빈 및 PMSG의 파라미터는 표 2와 같다.

그림 5는 정상운전 조건에서의 계통연계형 풍력발전 시스템의 통합 시뮬레이션 결과로 발전기측 컨버터와 계통측 인버터의 상세 제어특성을 보여준다. 발전기측 컨버터의 운전은 $t=0$ 에서 시작되며 계통측 인버터의 운전은 0.05초에서 시작된다. 그림 5의 첫 번째 파형은 발전기측 컨버터에 의해 제어되는 발전기 a상 전압 v_{asm} 과 전류 i_{asm} 을 나타내며 동위상의 단위역률을 가짐을 확인할 수 있다. 두 번째 파형은 계통측 인버터에 의해 제어되는 a상 계통전압 e_{asg} 와 계통출력 상전류 i_{asg} 를 나타낸다. 계통출력 전류가 계통전압과 동위상의 정현파로 단위역률을 지니는 전력을 전달함을 확인할 수 있다. 세 번째 파형은 직류단 전압 명령 V_{DC}^* 와 V_{DC} 로 직류단 전압이 일정하게 잘 제어되고 있음을 확인할 수 있다. 네 번째 파형은 계통측 인버터의 q축 전류명령 i_{qeg}^* , q축전류 i_{qeg} , d축전류 i_{deg} 및 a상전류 i_{asg} 를 나타내며 전류제어가 효과적으로 이루어짐을 확인할 수 있다. 다섯 번째에서 일곱 번째 파형은 각각 Back-to-Back 컨버터의 입력전력 W_{in} 과 출력전력 W_{out} , 블레이드에서 PMSG에 공급하는 토크 T_m , 및 주속비 λ 를 나타낸다. 입출력 전력이 4 kW이며 주속비가 8.18의 λ_{opt} 값으로 제어됨을 확인할 수 있다.

그림 6은 발전기측 3상 컨버터의 a상 상측 스위치 T_{a+} 에 개방고장이 발생한 경우의 응답특성을 나타낸다. 각각의 파형은 그림 5에서 설명된 파형 성분에 대응되며 발전기에서 컨버터로 a상의 양의 전류가 흐를 수 없음을 알 수 있다. 전류제어가 동기좌표계 상에서 이루어지므로 한 스위치의 개방고장 시에도 3상전류는 평형 상태를 유지하지 못하며, 고장과 무관한 다른 상전류도 제어되지 못하는 특징이 나타난다. 또한 발전기 a상에 과도전압이 관찰되며, 이는 직류단 전압제어 특성에 영향을 주게 된다. 직류단 전압제어 특성은

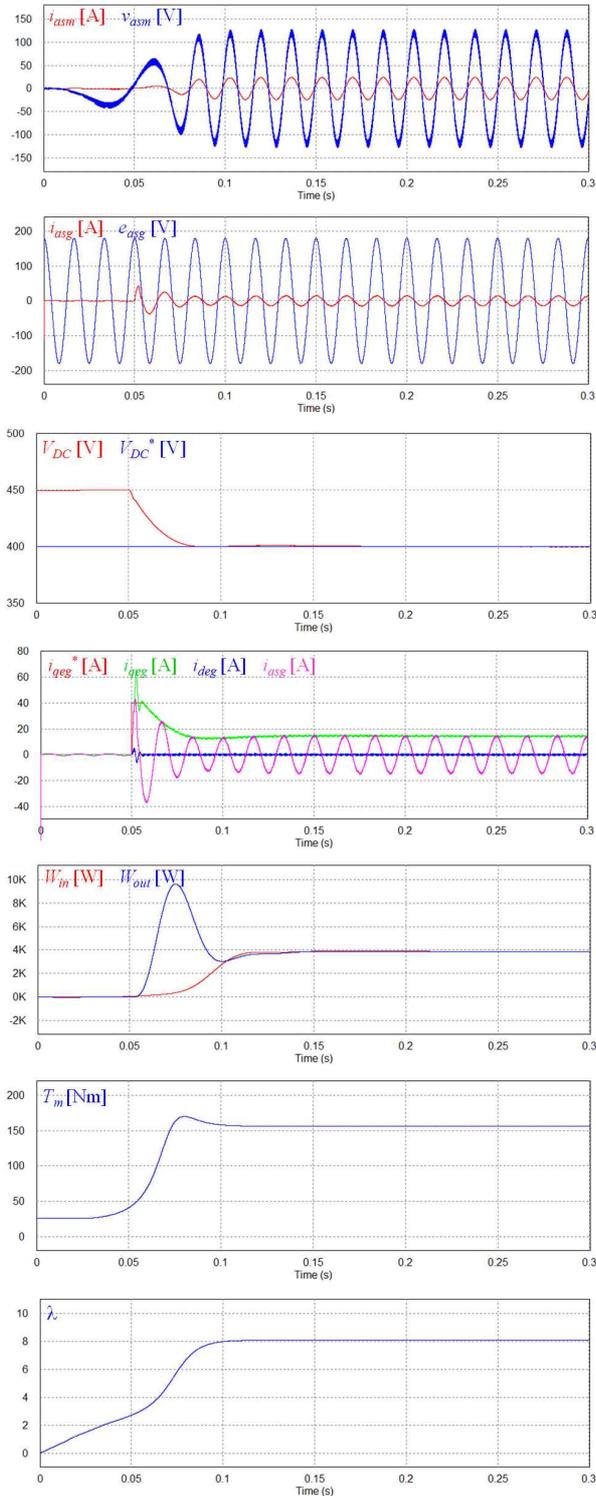


그림 5. 정상운전 조건에서의 시뮬레이션 결과
 Fig. 5. Simulation results under normal operating condition

고장과 무관한 계통측 인버터의 q축과 d축 전류제어 특성에도 영향을 주어 궁극적으로 고조파 증가에 따른 역률저하, 계통출력 전력 감소를 일으킨다. 또한 발

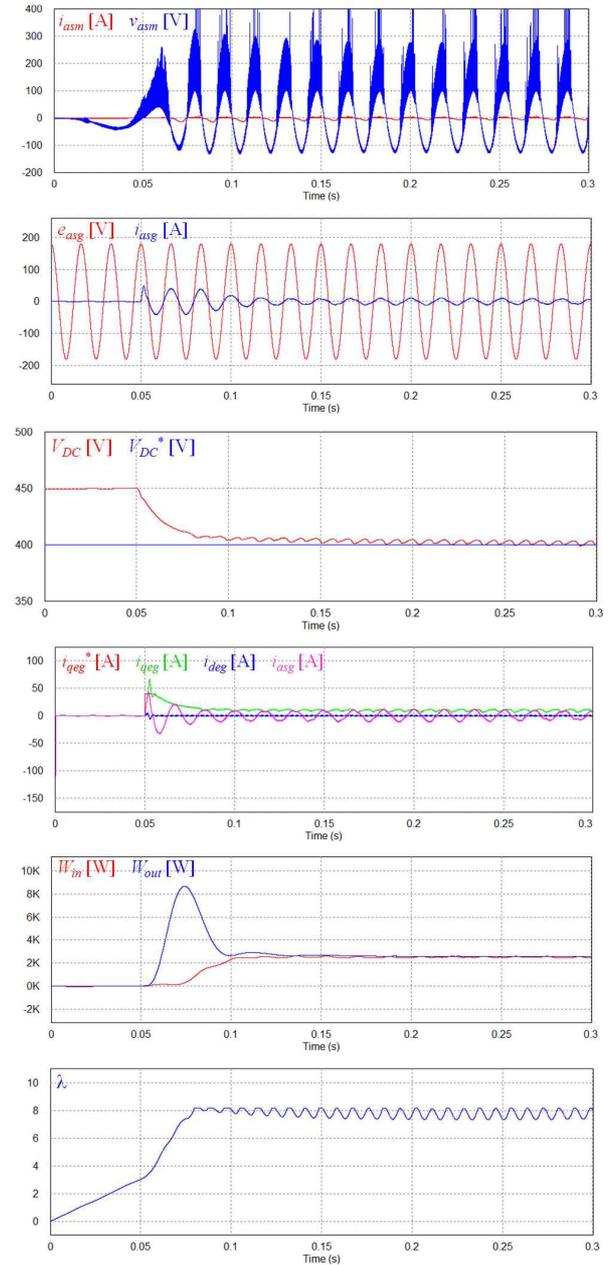


그림 6. 발전기측 3상 컨버터의 a상 상측 스위치 개방고장 시 시뮬레이션 결과
 Fig. 6. Simulation results under a-phase upper switch open fault in generator-side 3-phase converter

전기축 컨버터 전류특성이 발전기의 토크 및 속도에

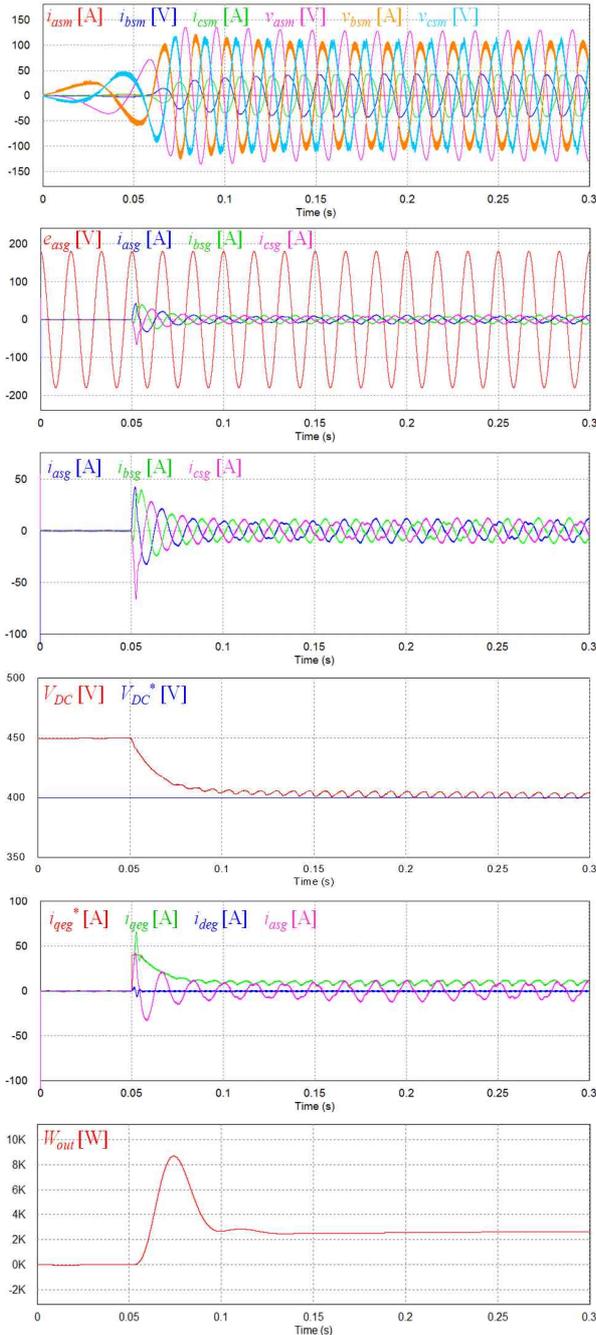


그림 7. 발전기측 3상 컨버터 a상 전체 스위치 개방고장 시 시뮬레이션 결과
 Fig. 7. Simulation results under entire switch open fault in a-phase of generator-side 3-phase converter

리플을 발생시키고 이는 주속비 제어특성 저하를 일으켜 풍력터빈의 최대발전이 이루어질 수 없게 하는 요인이 된다.

그림 7은 발전기측 3상 컨버터의 a상 전체 스위치에 개방고장이 발생한 경우의 응답특성을 나타낸다. 각 파형은 그림 5에서 설명된 파형 성분에 대응되며 Arm 전체 스위치의 개방고장 발생 시 컨버터 a상은 발전기로부터 전혀 전력을 공급받을 수 없고, a상전류는 영으로 유지되며 나머지 두 상에는 서로 반대 부호의 전류가 흐름을 볼 수 있다. 고장과 무관한 다른 상에서도 발전기와 컨버터는 동위상의 단위역률로 동작할 수 없으며, 이러한 특성은 직류단 전압제어와 계통측 인버터에도 영향을 주어 직류단 전압제어 성능 저하 및 계통측 인버터의 고조파 증가에 따른 역률 저하 특성을 확인할 수 있다. 또한 고장이 없는 정상운전 조건에 비해 Back-to-Back 컨버터의 출력전력 W_{out} 이 현저히 작아짐을 관찰할 수 있다.

이상의 결과와 같이 PMSG와 Back-to-Back 컨버터 기반의 풍력발전 시스템에서는 단 하나의 스위치에 개방고장이 발생하더라도 최대 발전전력을 얻을 수 없으며, 유/무효 전력제어가 불가능해진다. 4절에서는 발전기 및 전력변환장치의 이상 유무를 신속히 감지하는 상태감시 기법으로 무부하 발전전압, 쇄교자속 및 고정자 저항을 추정하는 방법을 제안하였다.

그림 8은 발전기측 3상 컨버터의 a상 상측 스위치 T_{a+} 에 0.2초인 순간 개방고장이 발생할 때의 응답특성과 상태감시 특성을 나타낸다. 정상운전 파형이 0.2초에서 비정상적으로 전환됨을 볼 수 있다. PMSG의 무부하 발전전압 e_{gem} , 쇄교자속 λ_m 및 고정자 저항 R_s 의 추정은 0.1초에 시작되는데 모든 파라미터의 추정치는 스위치에 개방고장이 없을 때 0.01초 내에 정상적인 값으로 도달하게 되나 개방고장이 발생하는 순간 비정상적 진동 특성을 주게 되어 이들 파라미터가 시스템의 이상 유무를 검출하는데 유용하게 사용할될수 있음을 확인할 수 있다.

그림 9는 발전기측 3상 컨버터의 a상 전체 스위치에 0.2초에 개방고장이 발생할 때의 응답 및 상태감시 특성을 나타낸다. 0.2초에서 시스템 운전이 비정상적

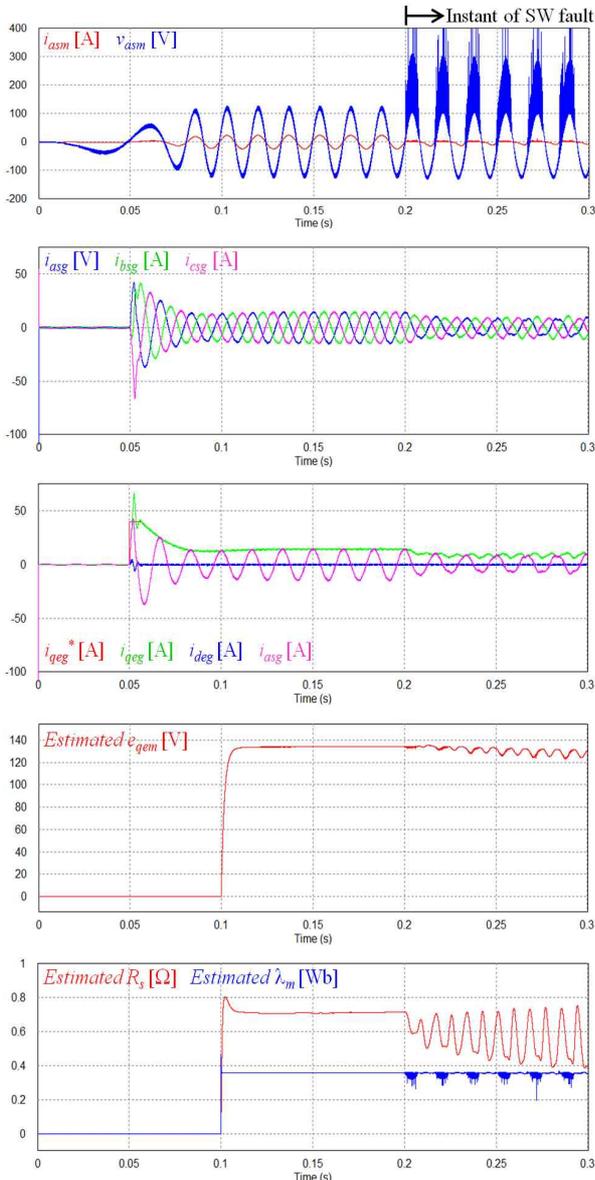


그림 8. 발전기측 3상 컨버터의 a상 상측 스위치 개방고장 시 응답 및 상태감시 특성
 Fig. 8. Simulation results and condition monitoring under a-phase upper switch open fault in 3-phase converter

로 변화함을 확인할 수 있으며, 발전 시스템의 이상 유무를 검출하기 위한 e_{gem} , λ_m 및 R_s 의 추정치는 정상 운전 조건에서 빠르게 실제 값으로 수렴하나 스위치 개방고장 순간 비정상적으로 진동하는 특성을 확인할 수 있다.

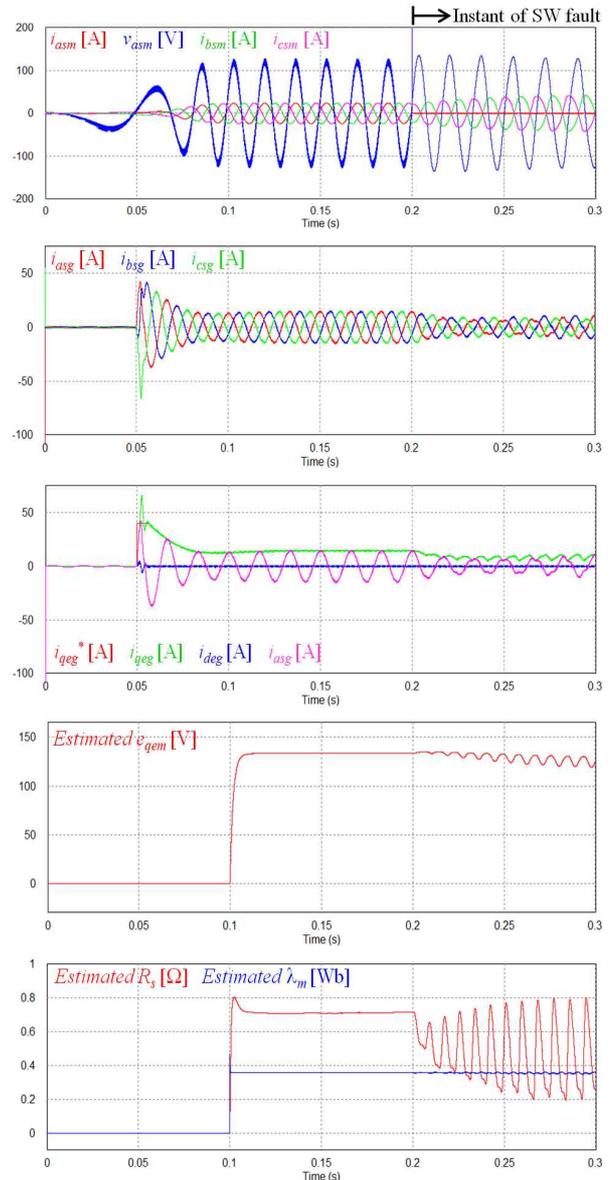


그림 9. 발전기측 3상 컨버터 a상 전체 스위치 개방고장 시 응답 및 상태감시 특성
 Fig. 9. Simulation results and condition monitoring under entire switch open fault in a-phase of 3-phase converter

6. 결 론

본 논문에서는 PMSG 적용 가변속 계통연계형 풍력발전 시스템에서 스위칭 소자의 개방으로 인해 발생하는 고장을 해석하고 진단 알고리즘의 시험 평가를

위해 유용하게 사용할 수 있는 고장모델 및 응답특성을 통합 시뮬레이션 모델을 통해 제시하였다. 전력변환장치에서 발생하는 스위치의 개방고장으로 발전기측 컨버터에서의 하나 혹은 Arm 전체 스위치의 개방고장이 고려되었으며, 이러한 고장은 과전류에 의한 소손 혹은 보호회로에 의한 강제 단선 등으로 발생하게 된다. 발전기측 컨버터에 스위치의 개방고장이 발생하게 되면 제어기에서 계산된 3상전압을 합성할 수 없어 전류의 고조파 성분의 증가와 발전전력의 감소를 발생함은 물론 계통측 인버터에도 고조파 증가, 계통출력 감소와 같은 영향이 나타나게 된다. 추가적인 진단장비 없이 On-line 방식으로 발전 시스템의 신뢰성을 향상시키고 시스템의 이상 유무를 검출하기 위한 효과적인 방법으로 본 논문에서는 PMSG의 무부하 발전전압, 쇄교자속 및 고정자 저항을 모니터링하는 기법을 제안하였으며, 시뮬레이션을 통해 그 타당성을 입증하였다.

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임. (2012R1A1A2042759)

References

- [1] Z. Chen, J. M. Guerrero, and F. Blaabjerg, "A review of the state of the art of power electronics for wind turbines", *IEEE Trans. on Power Electr.*, vol. 24, no. 8, pp. 1859-1875, 2009.
- [2] I. Munteanu, S. Bacha, A. Bratcu, J. Guiraud, and D. Roze, "Energy-reliability optimization of wind energy conversion systems by sliding mode control", *IEEE Trans. on Energy Conv.*, vol. 23, no. 3, pp. 975-985, 2008.
- [3] S. Grabic, N. Celanovic, and V. Katic, "Permanent magnet synchronous generator cascade for wind turbine applications", *IEEE Trans. on Power Electr.*, vol. 23, no. 3, pp. 1136-1142, 2008.
- [4] S. J. Oh, M. Y. Cha, J. W. Kim, J. K. Jeong, B. M. Han, and B. H. Chang, "Development of hardware simulator for DFIG wind power system composed of anemometer and motor-generator set", *The Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, vol. 16, no. 1, pp. 11-19, 2011.
- [5] E. H. Kim, K. B. Kang, J. H. Kim, S. H. Moon, S. B. Oh, and S. H. Kim, "Modeling and analysis of variable wind speed turbine system using back to back converter", *Journal of The Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, vol. 19, no. 8, pp. 150-157, 2005.
- [6] D. Y. Yu, Y. S. Choi, H. H. Choi, and J. W. Jung, "Fuzzy speed controller design of permanent magnet synchronous generators for variable-speed wind turbine systems", *Journal of The Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, vol. 25, no. 2, pp. 69-79, 2011.
- [7] A. D. Hansen, and G. Michalke, "Multi-pole permanent magnet synchronous generator wind turbines' grid support capability in uninterrupted operation during grid faults", *IET Renewable Power Gener.*, vol. 3, no. 3, pp. 333-348, 2009.
- [8] S. H. Jang, H. G. Park, D. C. Lee, and H. G. Kim, "Sensorless control of PMSG for small wind turbines", *The Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, vol. 14, no. 1, pp. 15-22, 2009.
- [9] A. H. Kasem, E. F. El-Saadany, H. H. El-Tamaly, and M. A. A. Wahab, "An improved fault ride-through strategy for doubly fed induction generator-based wind turbines", *IET Renew. Power Gen.*, vol. 2, no. 4, pp. 201-214, 2008.
- [10] ISET Offshore M&R Final Public Report, "Advanced maintenance and repair for offshore wind farms using fault prediction and condition monitoring techniques", funded by the European Commission.
- [11] P. Caselitz, and J. Giehardt, "Condition monitoring and maintenance strategies for the next generation of large offshore wind turbines", *ISET Offshore M&R Final Public Report*.
- [12] H. Polinder, H. Lendenmann, R. Chin, and W. M. Arshad, "Fault tolerant generator systems for wind turbines", *IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, pp. 675 - 681, 2009.
- [13] M. A. Parker, Ng Chong, and Ran Li, "Fault-tolerant control for a modular generator converter scheme for direct-drive wind turbines", *IEEE Trans. on Indus. Electr.*, vol. 58, no. 1, pp. 305-315, 2011.
- [14] F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, and P. Vas, "Recent developments of induction motor drives fault diagnosis using AI techniques", *IEEE Trans. on Indus. Electr.*, vol. 47, no. 5, pp. 994-1004, 2000.
- [15] M. A. Awadallah, M. M. Morcos, S. Gopalakrishnan, and T. W. Nehl, "A neuro-fuzzy approach to automatic diagnosis and location of stator inter-turn faults in CSI-fed PM brushless DC motors", *IEEE Trans. Energy Conv.*, vol. 20, no. 2, pp. 253-259, 2005.
- [16] R. L. A. Ribeiro, C. B. Jacobina, E. R. C. Silva, and A. M. N. Lima, "Fault detection of open-switch damage in voltage-fed PWM motor drive systems", *IEEE Trans. Power Electr.*, vol. 18, no. 2, pp. 587-593, 2003.
- [17] R. Spee, and A. K. Wallace, "Remedial strategies for brushless DC drive failures", *IEEE Trans. Indus. Appl.* vol. 26, no. 2, pp. 259-266, 1990.
- [18] T. H. Liu, J. R. FU, and T. A. Lipo, "A strategy for improving reliability of field-oriented controlled induction motor drives", *IEEE Trans. Indus. Appl.* vol. 29, no. 5, pp.

910-918, 1993.

[19] S. Heier, and R. Waddington, Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems. John Wiley & Sons, 2006.

[20] P. C. Krause, Analysis of Electric Machinery. New York: McGraw-Hill, 1986.

[21] C. K. Chun, and C. U. Kim, "Current sensorless three phase PWM AC/DC boost converter with unity power factor", Journal of The Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, vol. 17, no. 6, pp. 105-112, 2003.

[22] J. J. Kim, and S. H. Song, "PSCAD / EMTDC simulation model of variable speed wind power generation system using permanent magnet synchronous machine", The Transactions of Korean Institute of Power Electronics, vol. 10, no. 6, pp. 610-617, 2005.

[23] R. C. Dorf, and R. H. Bishop, Modern Control Systems. Prentice-Hall International Editions, 2005.

[24] H. W. van der Broeck, H. C. Skudelny, and G. V. Stanke, "Analysis and realization of a pulsewidth modulator based on voltage space vectors", IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 24, no. 1, pp. 142-150, 1988.

[25] J. S. Ko, J. H. Lee, and M. J. Youn, "Robust digital position control of brushless DC motor with adaptive load torque observer", IEE Electr. Power Appl., vol. 141, no. 2, pp. 63-70, 1994.

[26] Y. D. Landau, Adaptive Control - The Model Reference Approach. Marcel Dekker, New York, 1979.

◇ 저자소개 ◇



김경화 (金庚和)

1969년 3월 11일생. 1991년 2월 한양대 전기공학과 졸업. 1993년 2월 KAIST 전기및전자공학과 졸업(석사). 1998년 2월 동 대학원 졸업(박사). 1998~2000년 삼성 전자 선임연구원. 2000~2002년 KAIST 연구교수. 2002년~현재 서울과학기술대 전기정보공학과 부교수.



송화창 (宋和昌)

1973년 1월 24일생. 1997년 2월 고려대 전기공학과 졸업. 1999년 2월 고려대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 2월 동 대학원 졸업(박사). 2003~2004년 아이오아주립대 post doctoral scholar. 2005~2007년 군산대 전자정보공학과 조교수. 2008년~현재 서울과학기술대 전기정보공학과 부교수.



최병욱 (崔秉旭)

1963년 2월 13일생. 1992년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(박사). 1988~2000년 LG산전(주) 책임연구원. 2000~2005년 선문대학교 제어계측공학과 부교수. 2003~2005년 (주)임베디드웹 대표이사. 2005년~현재 서울과학기술대학교 전기정보공학과 교수.