

DQ 등가회로를 이용한 DFIG 보호계전방식

강용철*, 이지훈*, 장성일*, 김용균**
 *전북대학교, ** (주)한국 IED Eng. Inc.

Protection relaying algorithm for DFIG using a DQ equivalent circuit

Yong-Cheol Kang*, Ji-Hoon Lee*, Sung-Il Jang*, Yong-Gyun Kim**
 *Chonbuk National University, **Hankook IED Eng.

Abstract - Most of modern wind turbines employs a doubly-fed induction generator (DFIG) system because it has many advantages due to variable-speed operation, relatively high efficiency and its small converter size. The DFIG system uses a wound rotor induction machine so that the magnetizing current of the generator can be fed from both the stator and the rotor. This paper presents a protection relaying algorithm for DFIG using the DQ equivalent circuits. The induced voltages calculated from the stator and rotor sides are nearly the same in the steady state. They become different in the DQ equivalent circuits during an internal fault. The proposed algorithm compares the induced voltages estimated from the stator and the rotor circuit converted into the stationary reference frame. If the difference between the induced voltages exceeds the threshold, the proposed algorithm detects an turn-to-turn fault.

1. 서 론

현재 신·재생 에너지 중 풍력발전은 타 전원 에 비해 생산단가가 저렴하여 보급률이 높으며, 기술개발로 인하여 대용량화 되어가는 추세이다. 풍력발전 시스템의 단위 용량이 증가하면서 시스템의 신뢰성과 경제성이 강조되어 현재는 차세대 풍력발전 시스템의 형태로 이중여자 발전 시스템이 정착되었다. 이중여자 발전 시스템은 발전기의 크기가 작고 전력변환장치의 용량이 작아지는 장점이 있기 때문에, 현재 개발되는 수 MW 이상 시스템의 2/3 이상이 이중여자 발전 시스템의 형태로 개발되고 있다. 이중여자 발전 시스템(Doubly-Fed Induction Generator, DFIG)은 권선형 유도기를 사용하여 고정자에서 전기를 공급할 수 있을 뿐 아니라, 회전자에서도 유도기의 자속 발생에 필요한 전기를 공급할 수 있다.

이중여자 유도 발전기의 보호는 발전기의 용량에 따라 소용량, 중용량, 대용량으로 구분하여 보호 시스템을 구성하고 있다. 보호 시스템을 구성하고 있는 보호요소 중 비유동계전방식(87)이 주 보호요소로 사용된다. 하지만 비유동계전방식의 경우 권선의 층간단락사고 시 차전류가 생기지 않아 계전기가 오부동작하게 된다. 따라서 이중여자 유도 발전기의 주 보호방식으로 권선의 층간단락사고 시에도 정확히 동작하는 보호계전 알고리즘이 필요하다.

본 논문에서는 DQ 등가회로를 이용한 DFIG 보호계전방식을 제안한다. 제안한 방식은 DFIG의 고정자 변수와 고정자 측으로 환산한 회전자 변수를 정지좌표계로 변환시켜 DFIG의 DQ 등가회로를 얻는다. DQ 등가회로 상의 고정자 회로와 회전자 회로에서 계산된 자화인덕턴스(L_m)에 유기되는 전압을 비교하여 DFIG의 내부사고 인 권선의 층간단락사고를 판단한다. 제안한 방식의 성능을 검증하기 위해 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모의하였다.

2. DQ 등가회로를 이용한 DFIG 보호계전방식

2.1 DFIG의 DQ 등가회로

정지좌표계로 변환한 DFIG의 DQ 등가회로를 얻기 위해서 고정자 변수와 고정자 측으로 환산한 회전자 변수를 좌표변환 행렬을 이용하여 정지좌표계로 변환한다. 좌표변환 행렬은 식 (1)과 같고, 고정자 변수와 고정자 측으로 환산한 회전자 변수를 정지좌표계로 변환한 식은 (2)와 같다. 식 (2)에서 f_{abc} , f_{abc} 은 DFIG의 고정자 변수와 고정자 측으로 환산한 회전자 변수를 나타내며, f_{dqns}^s , f_{dqnr}^s 은 정지좌표계로 변환한 고정자 변수와 회전자 변수를 나타낸다. 또한, θ_e 는 동기 위상각을 나타내며, θ_{sl} 은 회전자 각과 동기 위상각의 차이인 슬립 각을 나타낸다.

$$T(\theta) = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}, R(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$f_{dqns}^s = T(0)f_{abc}, f_{dqnr}^s = R^{-1}(\theta_e)T(\theta_{sl})f_{abc} \quad (2)$$

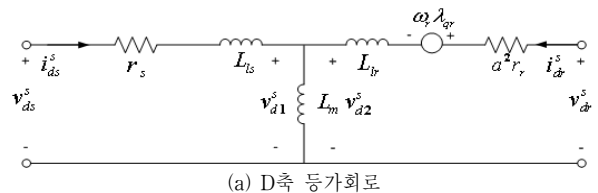
DFIG의 고정자와 고정자 측으로 환산한 회전자 전압방정식을 좌표 변환행렬을 이용하여 식 (2)와 같이 정지좌표계로 좌표변환 해주면 그림 1과 같이 정지좌표계로 변환한 DFIG의 DQ 등가회로를 얻을 수 있다. DFIG의 DQ 등가회로는 고정자 전압방정식을 정지좌표계로 변환한 고정자 회로와 고정자 측으로 환산한 회전자 전압방정식을 정지좌표계로 변환한 회전자 회로로 나누어진다. DFIG의 DQ 등가회로의 L_m 에 유기되는 전압을 고정자 회로와 회전자 회로 상에서 KVL 을 사용하여 구하면 식 (3)~(6)과 같다.

$$v_{d1}^s = v_{ds}^s - r_s i_{ds}^s - L_s \frac{di_{ds}^s}{dt} \quad (3)$$

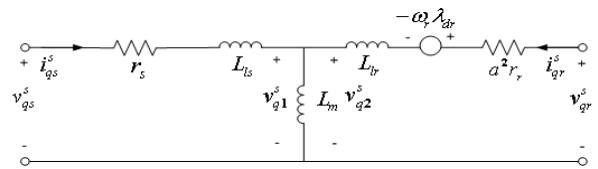
$$v_{d2}^s = v_{dr}^s - a^2 r_r i_{dr}^s - \omega_r (a^2 L_r i_{qr}^s + L_m (i_{qs}^s + i_{qr}^s)) - a^2 L_r \frac{di_{dr}^s}{dt} \quad (4)$$

$$v_{q1}^s = v_{qs}^s - r_s i_{qs}^s - L_s \frac{di_{qs}^s}{dt} \quad (5)$$

$$v_{q2}^s = v_{qr}^s - a^2 r_r i_{qr}^s + \omega_r (a^2 L_r + L_m (i_{ds}^s + i_{dr}^s)) - a^2 L_r \frac{di_{qr}^s}{dt} \quad (6)$$



(a) D축 등가회로



(b) Q축 등가회로

a: 권선비, r_s, r_r : 고정자와 회전자 권선저항

L_s, L_r : 고정자와 회전자 누설인덕턴스, ω_r : 회전자 각속도

<그림 1> 정지좌표계로 변환한 DFIG의 DQ 등가회로

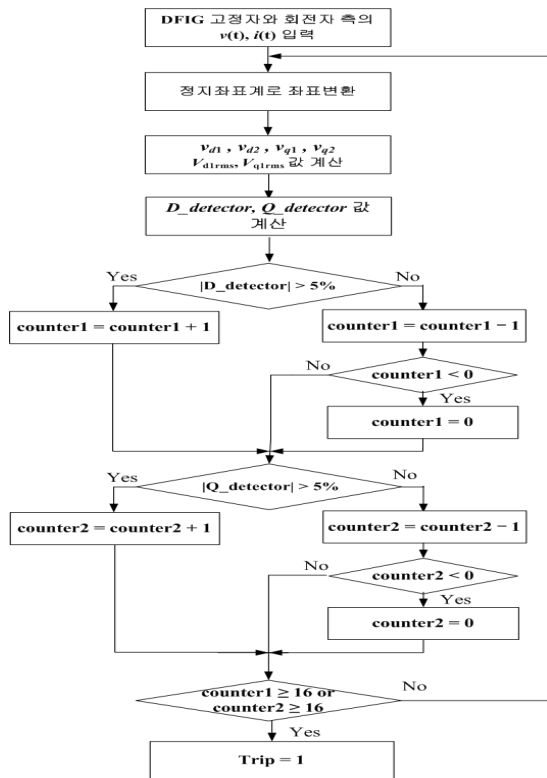
2.2 DQ 등가회로를 이용한 보호계전 알고리즘

제안한 알고리즘은 정지좌표계로 변환한 DFIG의 DQ 등가회로에서 고정자 회로와 회전자 회로에서 계산된 L_m 에 유기되는 전압의 값을 비교하여 권선의 층간단락 사고를 판단하는 방식이다. 정상상태 시, 고정자 회로와 회전자 회로 상에서 계산된 L_m 에 유기되는 전압의 값은 매우 비슷하지만, DFIG 내부에서 사고가 발생할 경우, DFIG의 DQ 등가회로가 달라지기 때문에 고정자 회로와 회전자 회로 상에서 계산된 L_m 에 유기되는 전압의 값은 같지 않게 된다. 따라서, 본 논문에서는 DFIG의 내부사고 전·후에 고정자 회로와 회전자 회로 상에서 계산된 L_m 에 유기되는 전압의 값을 비교하여 권선의 층간단락사고를 판단하는 방식을 제안한다. 제안한 방식은 DQ 등가회로 상에서 계산된 전압의 순시 값을 비교하기 때문에, 식 (7), (8)을 이용하여 DFIG의 정상상태와 DFIG 내부 층간단락 사고의 경우를 구분하고자 한다 [1]. 식 (7), (8)에서 V_{d1rms}^s, V_{q1rms}^s 는 DQ 등가회로의 고정자회로에서 계산된 L_m 에 유기되는 전압의 크기이다.

$$D_detector = \frac{v_{d2}^s - v_{d1}^s}{\sqrt{2} V_{d1rms}^s} \times 100 (\%) \quad (7)$$

$$Q_detector = \frac{v_{q2}^s - v_{q1}^s}{\sqrt{2} V_{q1rms}^s} \times 100 (\%) \quad (8)$$

제한된 DFIG의 보호계전 알고리즘의 순서도는 그림 (2)와 같다. D축과 Q축의 detector가 5% 이상이면 카운터를 1을 증가시키고, 5% 미만이면 1을 감소하였으며, D축과 Q축의 detector 중 하나가 카운터가 16이 되면 최종 트립을 결정한다. 카운터는 정상상태 시 외란에 의한 오동작을 방지하기 위해 사용하였다.

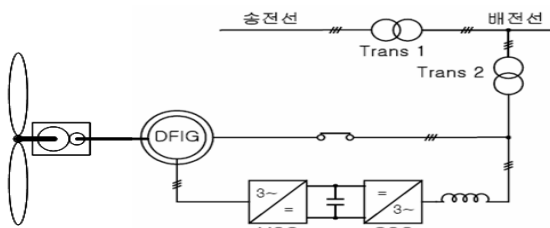


<그림 2> DFIG의 보호계전 알고리즘의 순서도

3. 사례 연구

3.1 모델 계통

제한된 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 PSCAD/EMTDC를 이용하여 그림 3과 같이 3kW DFIG를 모델링 하였다 [2]. DFIG 권선의 증간 단락 사고는 DFIG 고정자 권선의 내부 임피던스 값을 직렬로 연결된 외부 단자권선의 임피던스 값으로 분배하여, 외부 단자권선에 연결된 임피던스를 단락 시켜 줌으로서 권선의 증간 단락 사고를 모의 하였다 [3]. 샘플링 비율은 주기 당 64 샘플로 하였다.



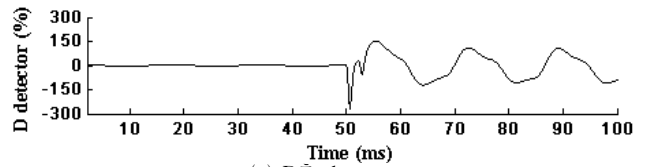
<그림 3> DFIG 모델 계통도

3.2 A상 고정자 권선의 20% 증간단락 사고

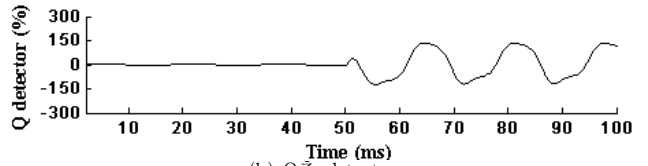
그림 4는 50 ms에 DFIG의 A상 고정자 권선의 20% 증간단락 사고 시, D축과 Q축의 detector와 트립신호를 나타내었다. D축과 Q축 detector의 경우 사고 전인 50 ms 이전에는 최대 값이 5% 미만인 4.2%와 4%가 되어 트립신호가 발생되지 않지만, 사고가 발생하는 50 ms 이후에는 D축과 Q축 detector에서 측정 되는 값이 5% 이상이 되기 때문에 사고 발생 후 4.16 ms(약 1/4주기) 이후인 54.16 ms에 사고를 판단하였다.

3.3 A상 고정자 권선의 40% 증간단락 사고

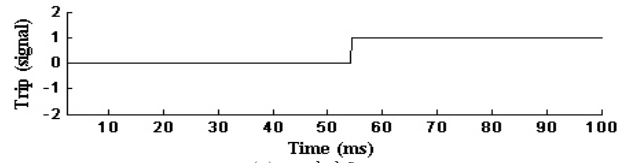
그림 5는 50 ms에 DFIG의 A상 고정자 권선의 40% 증간단락 사고 시, D축과 Q축의 detector와 트립신호를 나타내었다. D축과 Q축 detector의 경우 사고 전인 50 ms 이전에는 최대 값이 5% 미만인 4.2%와 4%가 되어 트립신호가 발생되지 않지만, 사고가 발생하는 50 ms 이후에는 D축과 Q축 detector에서 측정 되는 값이 5% 이상이 되기 때문에 사고 발생 후 4.15 ms(약 1/4주기) 이후인 54.15 ms에 사고를 판단하였다.



(a) D축 detector

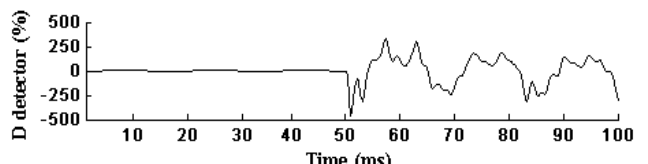


(b) Q축 detector

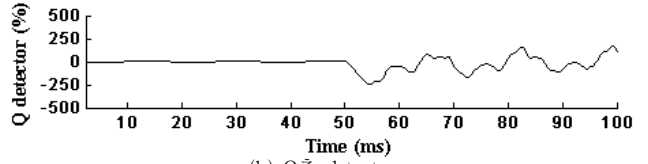


(c) 트립신호

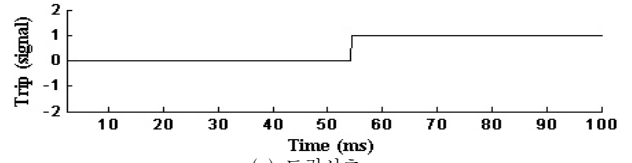
<그림 4> 20% 증간단락 사고 시 D축, Q축 detector와 트립 신호



(a) D축 detector



(b) Q축 detector



(c) 트립신호

<그림 5> 40% 증간단락 사고 시 D축, Q축 detector와 트립 신호

3. 결 론

본 논문에서는 DQ 등가회로를 이용한 DFIG 보호계전방식을 제안하였다. 제안된 방식은 정지좌표계로 변환된 DFIG의 DQ등가회로에서 고정자 회로와 회전자 회로에서 계산된 L_m 에 유기되는 전압을 비교하여 DFIG의 내부사고를 판단하는 방식이다. 고정자 회로에서 유기되는 전압과 회전자 회로에서 유기되는 전압 사이의 차이가 설정치 이상이 될 경우 제안된 알고리즘은 발전기 내부에서 증간 단락이 발생한 것으로 판단한다.

사례연구를 통하여 DFIG 고정자 권선의 20%, 40% 증간단락 사고의 경우에 대해 제안된 DFIG 보호계전 알고리즘의 성능을 검증하였다. 유기전압의 차이를 이용한 방식은 DFIG 내부의 증간단락 사고 시, 1/4 주기 이내에 정동작 하였다. 제안된 방식은 발전기 보호에 사용되는 비올차동 계전기가 검출 할 수 없었던 증간 단락 사고를 검출 할 수 있어 계전기의 오부동작을 방지할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2006년도 산업자원부 전력산업연구개발사업 전력선행연구에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 강용철, 이병은, "유기전압비를 이용한 변압기 보호계전 알고리즘", 대한전기학회 논문지, Vol. 49A, No. 10, pp. 524~529, 2000.
- [2] 정병창, 송승호, 노도환, 김동용, "풍력 터빈 모의 실험을 위한 가변 토오크 입력형 시뮬레이터", 대한전기학회 논문지, Vol. 51, No. 8, pp. 467~474, 2002.
- [3] Zexiang Cai, Aiyun Gao, and Jiandong Jiang, "Modelling for Internal Faults of Induction Motors and Its Simulation on EMTDC", IPST 2003 in New Orleans, USA.