

A Power Analysis for DFIG According to Rotor Excitation

金 哲 浩* · 徐 泳 澤** · 吳 哲 洙***

(Chul-Ho Kim · Young-Taek Seo · Chul-Soo Oh)

Abstract - Doubly-Fed Induction Generator(DFIG) is adequate to maximize the energy capture from wind energy, whereby the turbine speed can be adjusted to a speed, at which a rated tip speed ratio be kept. In this paper, a power analysis for DFIG and its characteristics of power flow in grid-connected operation, are dealt with in speed range of super- and sub-synchronous region. In a test of the machine, whereby a doubly excited circuit configuration in stator as well as rotor with back to back PWM inverter have been equipped, a constant input torque is given and in that condition, power flow in stator and rotor circuit have been measured and compared with theoretical value. Furthermore, the power factor in stator and rotor circuit have been examined.

Key Words : Doubly-Fed Induction Generator, Wind Power, Power Factor, Grid-connected Operation, Power Flow

1. 서 론

일반적인 권선형 유도발전기는 동기속도 이상에서만 발전이 가능하다. 회전자 출력은 슬립에 비례하는 값으로 결정되고 그 출력의 조류는 항상 회전자가 전력을 소모하는 방향으로 정해진다. 이중여자 유도발전기(Doubly-Fed Induction Generator, DFIG)는 권선형 유도발전기를 이용한 고정자와 회전자 두 곳에 여자가 가능하도록 한 발전기이다. 따라서 회전자 여자의 방향에 따라 동기속도 이상에서 뿐만 아니라 동기속도 이하에서도 발전이 가능하므로 가변속 발전기에 적합하다. DFIG의 적용 사례는 가변속 풍력발전기, 가변속 양수발전 등에서 찾을 수 있다.

DFIG의 구형은 고정자 권선을 계통에 직접 연결하고, 회전자 권선은 양방향 전력조류가 가능한 인버터를 거쳐서 계통에 연결한다. DFIG에 인가되는 축 토크는 공극을 거쳐 회전자 출력과 합산 혹은 가감되어 고정자로 전달되고, 회전자 출력은 회전자 여자에 따라 결정된다.

일반적인 DFIG의 용량설정에 있어, 회전자 최대출력은 고정자 정격출력의 30% 정도로 설계하고 있으니, 일반적인 권선형 유도발전기에 비해 DFIG로써 출력증가를 30% 기할 수 있다.[1] 아울러 회전자 회로에 놓이는 인버터의 용량이 고정자에 놓이는 경우보다 30%로 줄일 수 있음이 다른 장점으로 꼽힌다.[2]

중전에는 권선형 유도기의 회전자 슬립전력회수로 구동기술에 대한 연구가 이루어졌으나, 1990년대 들어와서 국외의 풍력발전기 제조사에 의해 DFIG의 연구가 활발하게 진행되고 있고[1], 국내에서는 체계적인 연구가 미약하였다 할 수 있다. 1990년대 후반부터 고정자 유효전력과 무효전력의 독립 제어를 위해 회전자 인버터를 벡터제어하는 기법이 널리 이용되고 있다[3]-[7]. 근래의 국내연구는 고정자 역률이 회전자 여자전압 변화로 향상될 수 있다는 것과 동기속도 이상의 운전구간에서 동작점의 이동에 의한 운전영역 확장을 들 수 있다.[8][9]

대부분의 연구들이 고정자 출력제어 측면에 초점을 맞추고 있고, 회전자 출력과 역률에 대한 관계 규명에는 미흡하였다. DFIG의 주된 출력이 고정자 출력이지만, 넓은 속도범위에서 운전하기 위해서는 회전자에서도 상당한 슬립전력을 취급하게 되므로 회전자 출력에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 DFIG의 고정자와 회전자의 유효전력 및 무효전력 관계를 동기속도 이상과 이하에서 다루고자 하고, 이를 실험을 통하여 해석하고자 한다. 우선, 이상적인 유도발전기의 고정자와 회전자의 출력특성을 도입하고 DFIG의 경우를 이와 비교하였다. 나아가서 DFIG의 속도와 출력, 각 속도에서의 고정자와 회전자 역률특성, 가변속 운전시의 고정자 역률 해석 등을 수행하였다.

2. DFIG의 구조와 풍력발전예 적용

바람이 가지고 있는 풍력에너지 (Aerodynamic Wind Energy)는 풍속의 3승에 비례하고 풍력발전기의 날개에 전달되는 기계적출력(Shaft Power)은 그림 1과 같이 나타난

* 正 會 員 : 慶北大 工大 電氣工學科 博士課程

** 正 會 員 : 龜尾1大學 電氣科 副教授 · 工博

*** 正 會 員 : 慶北大 工大 電子電氣工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2002年 7月 7日

最終完了 : 2003年 5月 27日

다.[1] 날개의 형식에 따라 다소 다르긴 하지만, 각 풍속마다 출력이 최대가 되는 속도가 존재한다. 일정속 풍력발전기에서는 속도가 거의 변화하지 않고 각 풍속에 따른 출력의 변화를 슬립으로 수용한다(유도발전기의 경우). 가변속 풍력발전기에 있어서는 풍력발전기의 운전점을 이동하며 출력이 최대되는 점을 따라 갈 수 있도록 하고 있다. 일반적으로 가변속 풍력발전기가 일정속 풍력발전기보다 그 출력 이득(Yield)이 평균 20%정도가 높은데, 그 이유는 가변속 풍력발전기에 있어서 각풍속의 최대 출력점을 따라 운전할 수 있기 때문이다.

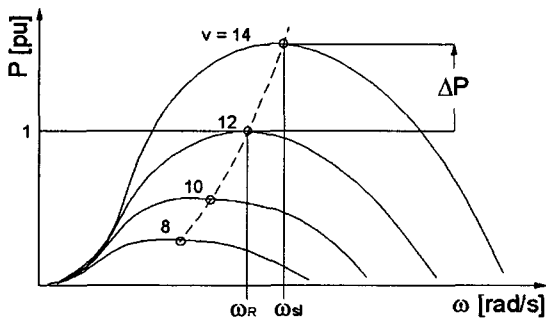


그림 1 풍력터빈의 속도 출력특성
Fig. 1 Power characteristic of wind turbine

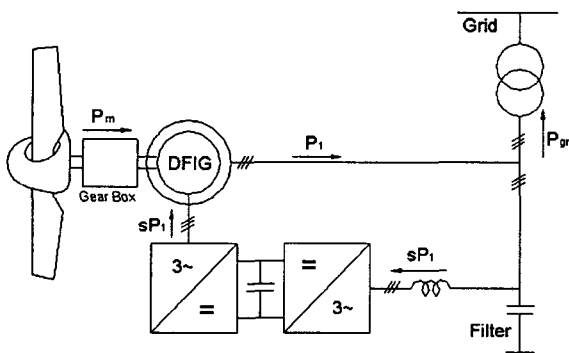


그림 2 DFIG 풍력발전기의 구조
Fig. 2 Configuration of DFIG wind power generator

DFIG는 권선형 유도발전기를 회전자측에서 여자를 하며, 고정자에서 출력을 얻도록 하는 장치이다. 회전자측 여자를 함에 있어 출력을 회전자 쪽으로 보내는 경우와 회전자에서 받아내는 두가지 모드를 생각할 수 있다. 이 두가지 모드가 가능하도록 하기 위해 회전자 측 회로에 두 대의 PWM 인버터(Back to Back PWM Inverter)를 설치하여 계통과 연계하도록 구성된 장치라 할 수 있다.[4]

위의 두 모드 중 전자의 경우가 동기속도 이하(Sub-synchronous)에서 운전하는 경우이고 후자의 경우가 동기속도 이상(Super-synchronous)에서 운전하는 경우이다. 이 두 모드에서의 전력조류를 도시한 것이 그림 3이다. (a)와 같은 동기속도 이하의 경우 회전자 측 출력전달은 회전자 인입방향으로 되며, 이때 계통측 인버터는 정류기로 회전자측 인버

터는 인버터로 동작하고, (b)와 같은 동기속도 이상의 경우 회전자 측 출력전달은 회전자에서 인출방향으로 되며, 이때 계통측 인버터는 인버터로 회전자측 인버터는 정류기로 동작하며, 그 조류는 각각 우측 그림과 같다. (a), (b)의 경우를 비교하면 (b)의 경우가 (a)경우보다 계통전력 P_{gr} 이 크게 그려져 있는 반면 P_1 은 같은 크기임을 알 수 있다. 그리고 $P_1 = P_{ag}$ (공극전력)의 크기는 두 경우 다 같다. 이는 동일한 용량의 기계로써 동기속도 이상의 경우 훨씬 더 많은 전력을 계통으로 보낼 수 있음을 알 수 있으며, 그 크기는 1.3 배의 P_{ag} 로서 기계자체보다 더 큰 전력을 생산할 수 있고, 이 또한 DFIG으로 장점으로 꼽힌다.

DFIG의 구동시스템, 즉 회전자 인버터는 양방향 전류조류(Power Flow)가 가능한 사이클로컨버터(Cycloconverter)나 매트릭스컨버터(Matrix Converter), 두 대의 PWM 인버터(Back to Back PWM Inverter) 등이 사용될 수 있다.[5] 회전자측만 인버터로 동작하고 계통측은 정류기로만 동작하는 단방향 인버터라면 동기속도 이하와 이상으로 속도제어는 가능하지만, 동기속도이상에서 회전자로 빠져 나오는 출력을 계통으로 회수하지 못하므로 운전범위가 제한된다. 회전자 인버터의 문제는 동기속도 부근에서 저주파수의 회전자 전류가 얼마나 정현파에 가깝게 공급될 수 있는가하는 것이다. 저주파수의 회전자 전류에 포함된 고조파성분이 고정자 전류에 영향을 주기 때문이다.

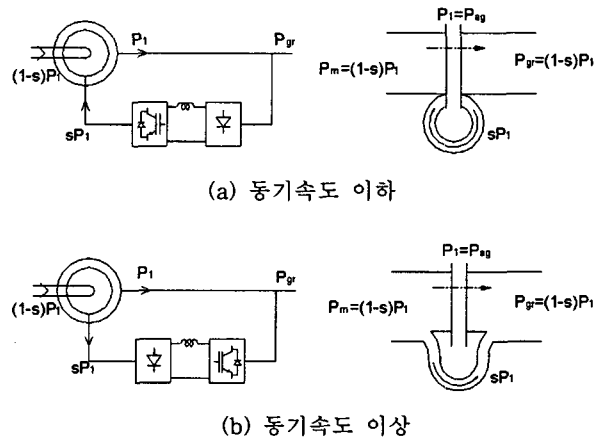


그림 3 DFIG의 전력조류
Fig. 3 Power flow of DFIG

3. DFIG의 특성방정식

이상적인 DFIG에서 P_m 을 기계입력으로, P_1 을 고정자 출력이라 하였을 때, 이의 관계식은 다음과 같다.

$$P_m = (1-s)P_1 \quad (1)$$

회전자 출력 P_2 는 슬립전력으로 sP_1 에 해당하며, 이 값을 두 모드에서 양의 값으로 취급하였고, 그에 따라 회전자 측 전류조류를 감안하여 그림 3에 나타내었다. 일반적인

유도기 해석에 있어서는 동기속도 이상의 경우 슬립이 '-'의 값을 가진다고 해석하고 있으나, 이를 이 논문에 적용할 경우 전력조류의 방향이 혼돈이 될 우려가 있으므로 슬립을 항상 양의 값으로 취급하고 오히려 전력조류의 방향을 뚜렷이 하는 것이 합리적이라 생각한다.

그림 4는 DFIG의 이상적인 출력특성을 나타낸 그림으로 고정자 출력이 일정하게 유지되는 경우이다.[10] P_2 는 슬립에 비례하여 그림과 같이 나타나야 하며, 기계적 출력 P_m 은 자연 그림과 같이 된다. 그림에서 f_2 와 ω 는 4극 기계 기준 회전자 주파수와 속도를 나타내었는데, f_2 는 동기속도 이상의 경우 편의상 '-'로 나타내었다.

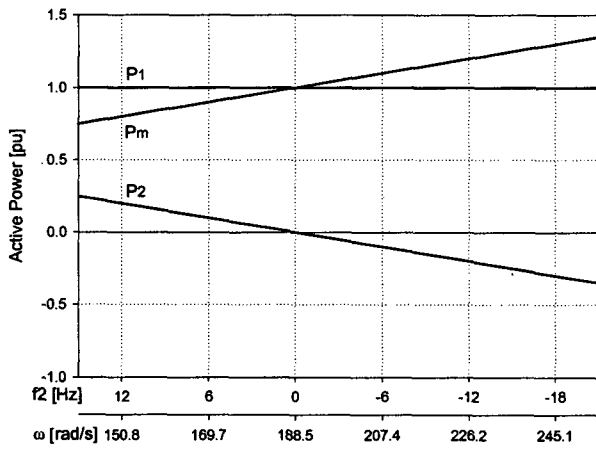


그림 4 이상적 DFIG 출력특성
Fig. 4 Power characteristics of ideal DFIG

일반적인 DFIG의 등가회로는 한 상을 나타내었을 때 그림 5와 같다. 여기에서 고정자 전류는 기계 인입방향으로, 회전자 전류는 기계에서 인출방향으로 잡았다. 여자 시스템의 상회전 방향은 다음과 같다. 동기속도 이하에서는 고정자와 같은 상회전 방향이 되도록하고, 발전기의 경우 실제로 동기속도 이하에서는 I_1, I_2 가 '-'가 되어야 하므로 회전자 여자시스템은 같은 상으로 외부에서 공급되어야 하고(동상여자), 동기속도 이상에서는 반대방향이 되도록 해야한다. 동기속도 이상에서는 I_1 은 '-', I_2 가 '+'가 되어야 하므로 회전자 여자시스템은 고정자와 상회전 방향이 다르게 되어야 한다(역상여자).[8]

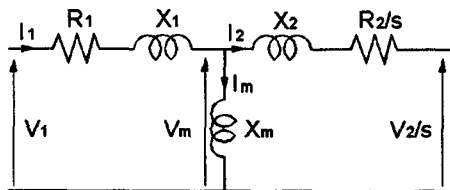


그림 5 DFIG의 등가회로
Fig. 5 Equivalent circuit of DFIG

등가회로를 기준으로 고정자와 회전자 전압방정식은 다음과 같다.[9]

$$\overline{V}_1 = \overline{I}_1(R_1 + jX_1) + jX_m(\overline{I}_1 - \overline{I}_2) \quad (2)$$

$$\frac{\overline{V}_2}{s} = jX_m(\overline{I}_1 - \overline{I}_2) - \overline{I}_2(R_2 + jX_2) \quad (3)$$

여기서 \overline{V}_1 은 고정자 전압, \overline{I}_1 은 고정자 전류, \overline{V}_2 는 회전자 여자전압, \overline{I}_2 는 회전자 전류, \overline{V}_m 은 자화리액턴스 유기기전력, R_1 은 고정자 저항, R_2 는 회전자 저항, X_1 은 고정자 누설리액턴스, X_2 는 회전자 누설리액턴스, X_m 은 자화리액턴스이다.

위 식들에서 알 수 있는 것은 고정자 전압 \overline{V}_1 이 고정된 상태에서 회전자 전압 \overline{V}_2 와 슬립 s 를 제어하면 고정자 전류 \overline{I}_1 과 회전자 전류 \overline{I}_2 의 크기와 위상을 바꿀 수 있고, 이의 실험을 다음 4장에서 다루었다.

등가회로에서 손실은 동손만이 존재하고 이를 각각 고정자와 회전자에 대해서 나타내면 식 (4), (5)와 같다.

$$P_{cs} = 3 I_1^2 R_1 \quad (4)$$

$$P_{cr} = 3 I_2^2 R_2 \quad (5)$$

여기서 P_{cs} 은 고정자 동손, P_{cr} 은 회전자 동손이다.

고정자 출력과 회전자 출력은 공극 출력에서 이들 동손을 뺀 값들이므로 식 (6), (7)과 같다.

$$P_1 = P_{ag} - P_{cs} \quad (6)$$

$$P_2 = sP_{ag} - P_{cr} \quad (7)$$

여기서 P_2 는 회전자 출력, P_{ag} 는 공극전력이다.

따라서 고정자 역률 PF_1 과 회전자 역률 PF_2 은 식 (8), (9)와 같다.

$$PF_1 = \frac{P_1}{3V_1 I_1} \quad (8)$$

$$PF_2 = \frac{P_2}{3V_2 I_2} \quad (9)$$

4. DFIG의 구현과 실험

4.1 실험장치 구성

DFIG의 각 속도의 영역에 따른 출력해석을 하기 위한 실험장치를 구현하였다. DFIG의 축에 기계적 입력을 가하기 위해 0.7kW 정격의 직류전동기를 사용하였다. DFIG의 고정자 권선은 계통에, 회전자 권선은 두 대의 PWM인버터와 변압기를 거쳐 계통에 연결시켰다. 회전자측 인버터는 동기 속도 이상과 이하에서 회전자 속도제어를 위해서 회전자 여자주파수를 만들어주기 위한 것이고, 계통측 인버터는 동기 속도 이상에서 회전자에서 빠져나오는 출력을 계통측으로 내보내기 위한 계통연계형 인버터이다. 회전자 회로의 전압은 슬립전압이므로 고정자 전압에 비해 상대적으로 낮기 때문에 변압기가 필요하다. 회전자에 인가되는 전압과 주파수는 회전자측 인버터가 담당하고, 동기속도 이상에서 회전자로 빠져나오는 출력을 계통으로 전달하기 위해서는 계통측 인버터가 계통 전원과 동기화가 되어야 하며, 이를 위해 계통전압과 동기가 되는 게이팅 신호를 만들었다. 고정자와 회전자의 출력 P_1 , P_2 의 측정을 위해 출력단에 Voltech사의 PM3000A Power Analyzer를 각각 설치하였다. Power Analyzer를 이용하여 60Hz 전원의 고정자와 가변주파수 회전자의 전압, 전류, 역률, 유효전력, 무효전력 등을 측정하였다. 실험에 사용한 권선형 유도기의 무부하 실험과 구속실험을 통해 구한 등가회로 파라미터와 정격은 표 1과 같다.

표 1 DFIG의 정격과 파라미터
Table 1 Rating and parameter of DFIG

출력, 극수	1 kW, 4극
전압	220V, 3상, 60Hz
전류	3.2A
권선비	1.27
R_1	3.0 Ω
R_2	6.3 Ω
X_1	5.1 Ω
X_2	5.1 Ω
X_m	69.2 Ω

4.2 DFIG의 속도와 출력

DFIG의 속도와 출력을 실험하기 위해 기본적으로 풍력발전기에 쓰이는 발전기로 모사화하는 것이 중요하다. 풍력발전기에서 속도 대 출력의 추적곡선은 그림 1의 점선으로 나타낸 곡선이고, 이를 선형화한 곡선이 즉 그림 4의 P_m 이 된다. 이 P_m 은 속도에 대한 상승직선으로 나타나며, 이는 바로 원동기를 일정토크로 운전함에 요구된다.

실험에서 회전자 여자주파수를 동기주파수 기준 '-25%~

35%'의 범위 중 '-5%~5%'의 동기속도 부근에서는 세밀하게 측정하였고, 나머지 구간에서는 3Hz (5%에 해당) 간격으로 하였다. 이때의 기계입력 P_m , 고정자 출력 P_1 , 회전자 출력 P_2 , 고정자 무효전력 Q_1 과 회전자 무효전력 Q_2 를 측정하였다. 식 (3)에 의한 $\overline{V_2}$ 의 크기에 따라 이들 출력값이 달라짐을 확인하였고, 이를 위해 고정자 역률을 일정한 값으로 하기 위해 V_2 를 맞추었다. 구체적으로 이야기하면 고정자 역률이 3가지의 대표되는 역률, 즉 단위 1, 지상 0.8, 진상0.8을 선정하여 측정의 기준으로 삼았고, 이때의 출력값을 각각 그림 6, 7, 8에 나타내었다. 이 세 그림에 대한 고찰은 다음과 같다.

DFIG의 이상적인 출력을 나타낸 그림 4와 비교해 볼 때, 우선 출력이 모두 선형적인 특성을 가진다는 것이다. 그리고 고정자 출력이 거의 일정값을 나타내는데, 이는 풍력발전에서 풍속의 변화에 따른 출력이 변하더라도 고정자의 출력은 거의 일정값을 유지할 수 있다는 것을 의미한다. 그리고 속도의 증가에 따라 출력이 다소 감소하는 경향은 풍손이나 마찰손 등의 회전손실의 증가에 기인한다고 볼 수 있다. 회전자 출력은 동기속도를 기준으로 해서 바뀌지 않는다. 동기속도는 188.5 [rad/s]인데, 이상적인 DFIG에서는 회전자 출력이 0이고, 동기속도 이하에서는 회전자에 출력을 공급해야 하고, 이상에서는 출력을 인출해 내어야 하는 점을 고려하면, 이상적인 회전자 출력에 대한 실험값의 차이는 회전자 동손이 대부분을 차지한다고 볼 수 있다.

각각의 출력특성을 비교해서 살펴보면 고정자 출력은 역률이 지상 0.8과 진상 0.8은 비슷하나, 단위역률일 때 가장 큰 것을 알 수 있고, 그 요인은 고정자 동손의 저감효과로 볼 수 있다. 하지만, 회전자 특성을 고려할 때 지상역률, 단위역률, 진상역률 순서로 선형적으로 많은 출력이 회전자에 공급되어야 한다는 것이다. 일반적으로 최적운전의 조건으로 고정자의 단위역률 운전을 들 수 있으나, 실험에서 살펴보면 회전자 동손이 상당한 부분을 차지하므로 위 3가지 경우에서만 비교하면 지상 0.8로 운전하는 것이 최대 출력을 나타내는 것을 알 수 있다.

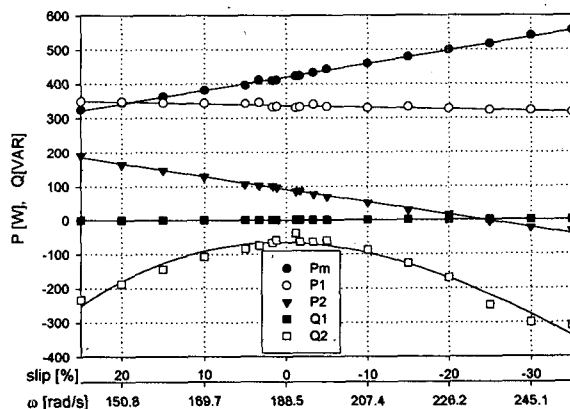


그림 6 고정자 단위역률(PF=1)에서 속도 대 출력특성
Fig. 6 Power characteristics at unity power factor

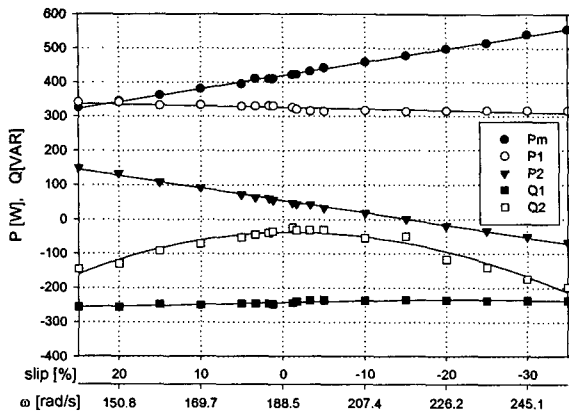


그림 7 고정자 지상역률(PF=0.8)에서 속도 대 출력특성
Fig. 7 Power characteristic at lagging (0.8) power factor

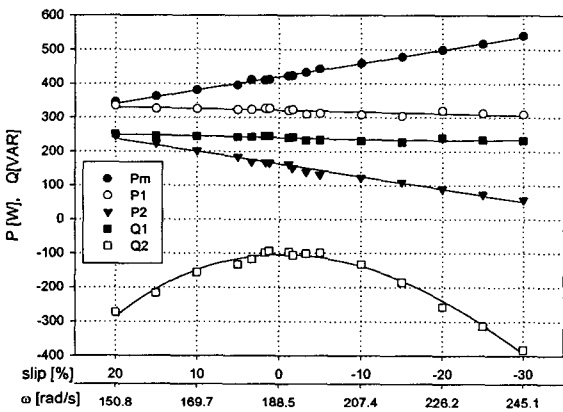


그림 8 고정자 진상역률(PF=0.8)에서 속도 대 출력특성
Fig. 8 Power characteristic at leading (0.8) power factor

4.3 각 속도에서의 고정자와 회전자 역률특성

일반적으로 3상 회전자에서 출력은 역률과 긴밀한 관계가 있고, 그 관계식은 식 (8), (9)와 같다. 고정자 전류와 역률, 회전자 전류와 역률의 특성을 파악하기 위해 동기속도 이상과 이하로 나누어 특성을 파악하였다. 실험에서 회전자 여자 주파수는 동기주파수 기준 '-25%~35%'의 범위를 3Hz (5%에 해당) 간격으로 하였다. 고정자는 계통에 연결되어 있으므로 V_1 은 일정하다. 동기속도 이상에서 고정자 전류와 역률을 그림 9, 10에 나타내었다. 결과를 명료하게 나타내기 위해 -3Hz에서 6Hz간격으로 나타내었다. V_2 에 대한 고정자 전류는 회전자 여자 주파수가 바뀌더라도 비슷한 형태를 유지했으며, 모든 주파수에 대해 V_2 가 증가함에 따라 고정자 전류는 서서히 감소하다 최저치를 나타낸 뒤 다시 상승하는 경향을 보였다. 고정자 역률은 단위역률을 기준으로 여자전압이 감소하면 지상으로, 증가하면 진상으로 운전되는 특성을 알 수 있었고, 동기발전기의 V곡선과 똑같은 특성을 나타내었다. 고정자 전류는 단위 역률에서 최저값을 나타내고, 주파수가 바뀌더라도 최저값은 거의 변화가 없다는 것을 그림 9을 통해 알 수 있다.

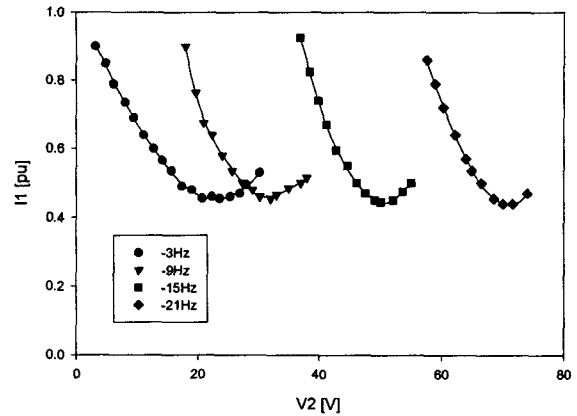


그림 9 동기속도 이상에서 회전자 전압에 따른 고정자 전류

Fig. 9 Stator current at super-synchronous speed

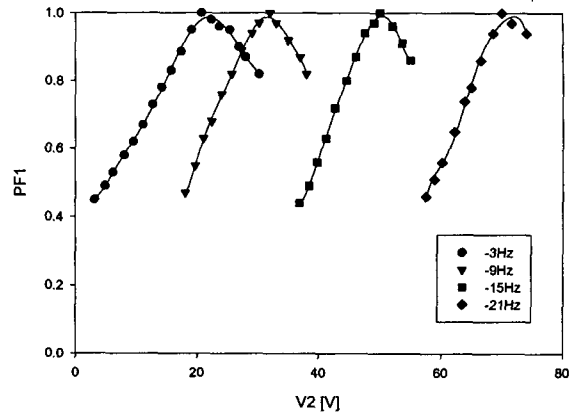


그림 10 동기속도 이상에서 회전자 전압에 따른 고정자 역률

Fig. 10 Stator power factor at super-synchronous speed

동기속도 이상에서의 동일한 조건에서 회전자 전류와 역률을 그림 11, 12에 나타내었다. 회전자 여자전압 V_2 의 변화에 따라 회전자 전류는 거의 선형적인 특성을 보였다. 회전자 역률은 모두 지상이고, -3Hz를 제외하고 모두 역률이 감소하여 0을 거친 뒤 증가하는데, 이것은 역률 0을 기준으로 그보다 낮은 회전자 전압에서는 회전자에서 출력이 빠져나오고, 높은 회전자 전압에서는 출력이 공급되게 된다. -3Hz에서는 동기속도 이상이지만, 그림 6, 7, 8에서 알 수 있듯이 회전자 저항 때문에 출력이 회전자에 공급되므로 다른 양상을 보인다. 즉, 회전자 여자주파수에 따라 동기속도 이상에서 출력을 뽑아낼 수 있는 전압이 달라진다.

동기속도 이하에서도 고정자 전류와 역률, 회전자 전류와 역률 특성을 알아보기 위해 회전자 인가 주파수를 3Hz 간격으로 회전자 여자전압을 가변시켰다.

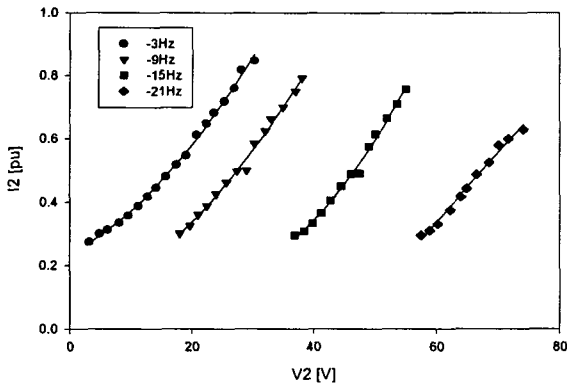


그림 11 동기속도 이상에서 회전자 전압에 따른 회전자 전류

Fig. 11 Rotor current at super-synchronous speed

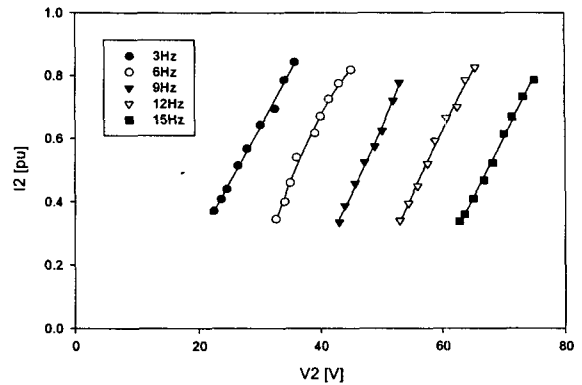


그림 13 동기속도 이하에서 회전자 전압에 따른 회전자 전류

Fig. 13 Rotor current at sub-synchronous speed

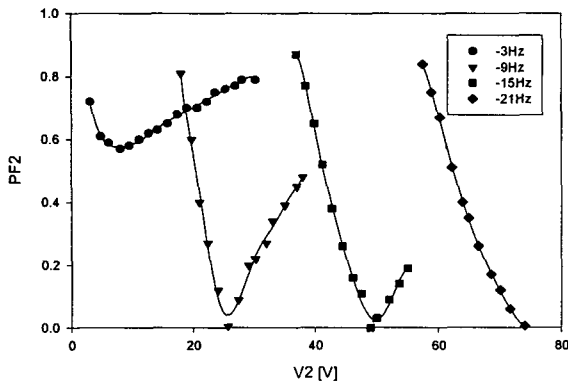


그림 12 동기속도 이상에서 회전자 전압에 따른 회전자 역률

Fig. 12 Rotor power factor at super-synchronous speed

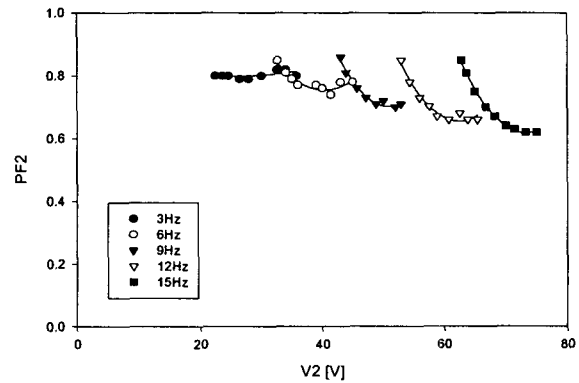


그림 14 동기속도 이하에서 회전자 전압에 따른 회전자 역률

Fig. 14 Rotor power factor at sub-synchronous speed

동기속도 이하에서의 고정자 전류와 역률은 동기속도 이상에서와 유사한 특성을 보이므로 생략하고, 회전자 전류와 역률에 대해서만 그림 13, 14에 나타내었다. 회전자 전류는 동기속도 이상에서처럼 거의 선형적인 특성을 보이는 것을 알 수 있다. 동기속도 이하에서는 항상 회전자에 출력이 공급되어야 하고, 지상역률로 주파수가 높아지면 회전자 리액턴스 성분이 증가하기 때문에 역률이 감소하는 경향을 보인다.

4.4 가변속 운전시의 고정자 역률

DFIG 시스템은 다른 일부 발전기와 달리 역률제어를 통해 계통에 무효전력을 공급할 수 있기 때문에 원동기의 속도에 따라 일정한 역률을 유지하기 위한 회전자 여자 전압과 전류를 실험을 통해 구하였고, 이를 그림 15, 16에 나타내었다. 고정자 출력이 일정한 경우에 대해 각각의 운전속도에서 역률이 단위, 진상, 지상이 되는 다섯 가지 경우를 나타내었다. 손실이 없는 시스템에서는 동기속도 부근에서 0이 되어야 하지만 회전자 손실 때문에 동기속도 보다 약간 빠른 속도에서 최저를 나타내고 있다.

그림 16에서는 일정한 역률을 유지하기 위한 회전자 전류에 대해 나타내었고, 해당 역률에 대해 거의 일정한 값을 보였다. 다만 동기속도 부근에서 약간 상승하는 경향을 보이나, 이는 아주 저주파수이기 때문에 발생하는 측정오차로 여겨진다.

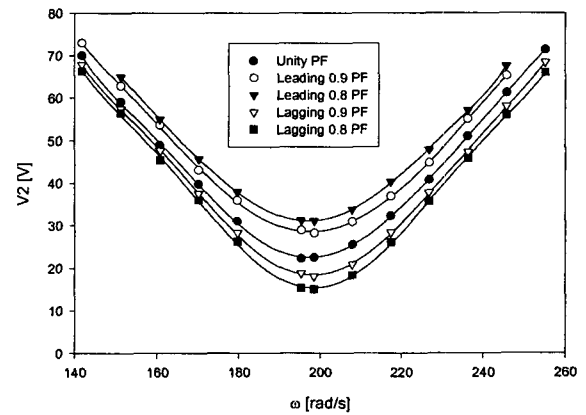


그림 15 일정역률을 유지하기 위한 회전자 전압

Fig. 15 Excitation voltage for constant power factor

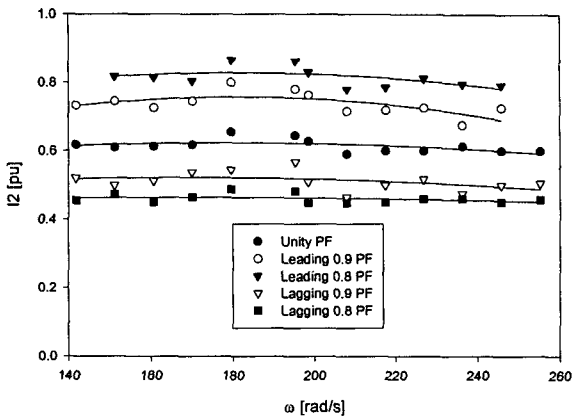


그림 16 일정역률을 유지하기 위한 회전자 전류
 Fig. 16 Excitation current for constant power factor

5. 결론

본 논문에서는 DFIG의 회전자 여자에 따른 고정자와 회전자의 출력을 해석하였다. 실험에서는 DFIG 입력측 원동기 토크를 구동 전동기 정격값으로 고정시키고, 동기속도 이상과 이하의 넓은 속도구간에서 고정자와 회전자의 역할이 V_2 에 따라 변하는 것을 확인하고, 회전자 여자에 따른 출력과 역할해석을 수행하였다.

고정자와 회전자의 유효전력은 역률에 관계없이 속도에 대해 모두 직선적인 특성을 보였고, 회전자의 상회전 방향은 동기속도이상과 이하의 경우 서로 반대이다. 일반적인 유도발전기에서는 출력이 동기속도 기준으로 그 방향이 바뀌지만, DFIG에서는 회전자 출력의 방향이 바뀌는 속도 구간의 시점을 여자주파수에 따라 가변시킬 수 있음을 확인하였다. 회전자 출력의 방향이 바뀌는 구간에서 회전자 역률은 급변하지만, 회전자 전류는 선형적인 특성을 보였다. 고정자 역률은 회전자 여자의 정도에 따라 지상에서 단위역률을 거쳐 진상으로 옮겨갔으며, 동기발전기의 V곡선과 유사한 특성을 보였다. 고정자 무효전력과 회전자 무효전력과의 비례관계를 실험을 통해 알 수 있었고, 계통에 무효전력공급 측면에서 고정자 단위역률과 진상, 지상 운전을 위한 회전자 여자 전압의 조건을 제시하였다.

참고 문헌

[1] S. Muller, M. Deicke, and Rik W. De Doncker, "Doubly Fed Induction Generator Systems for Wind Turbines", IEEE Industry Applications Magazine, May/June, pp.26~33, 2002.

[2] A. Masmoudi, "DFSM Rotor-Side Converter Pre-Design Investigation: A Comparison between Voltage and Current Control Strategies", ETEP, Vol. 9, No. 5, pp.297~304, 1999.

[3] L. Xu and W. Cheng, "Torque and Reactive Power Control of a Doubly Fed Induction Machine by Position Sensorless Scheme", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, No. 3, pp.636~642, 1995.

[4] R. Pena, J.C. Clare, and G.M. Asher, "Doubly Fed Induction Generator using Back-to-Back PWM Converters and its Application to Variable Speed Wind Energy Generation", IEE Proceeding B, Vol. 143, pp.231~241, 1996.

[5] L. Zhang, C. Watthanasarn and W. Shepherd, "Application of a Matrix Converter for the Power Control of a Variable-Speed Wind-Turbine Driving a Doubly-Fed Induction Generator", IECON'97, Vol. 2, pp.906~911, 1997.

[6] B. Eggert, "1.5MW Wind Power Station with Low AC-line Distortion using a Standard Doubly-fed Generator System with Field Orientation Control", EPE'97, pp. 2,739~2,742, 1997.

[7] Shibashis Bhowmik, Rene Spee, and Johan Enslin, "Performance Optimization for Doubly Fed Wind Power Generation Systems", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 35, No. 4, pp. 949~958, 1999.

[8] 서영택, 이우석, 오철수, "풍력발전용 회전자 여자 시스템 권선형 유도발전기의 역할 해석", 대한전기학회 논문지 46권 9호, pp.1340~1346, 1997.

[9] 이우석, 오철수, "풍력발전용 권선형 유도발전기의 회전자 여자주파수를 이용한 속도와 출력제어", 대한전기학회 논문지 48B권 7호, pp.349~356, 1999.

[10] B. K. Bose, "Adjustable Speed AC Drive Systems", IEEE, 1981.

저 자 소 개



김철호 (金哲浩)

1971년 8월 29일생. 1995년 경일대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 경북대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 053-940-8603, Fax : 053-950-5508

E-mail : ch8kim@hanmail.net



서영택 (徐泳澤)

1958년 8월 10일생. 1989년 경일대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 경북대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1996년~현재 구미 1대학 전기과 부교수

Tel : 054-440-1204, Fax : 054-442-4060

E-mail : ytseo@kumi.ac.kr



오철수 (吳哲洙)

1938년 8월 26일생. 1963년 독일 Stuttgart 공대 전기공학과 졸업. 1966년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 영남대 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1966년~1972년 독일 Siemens사 근무. 1984년~현재 경북대 공대 전자전기공학부 교수

Tel : 053-950-5603, Fax : 053-950-5508

E-mail : csoh@knu.ac.kr