

## 2중 인버터 시스템을 갖는 해상용 풍력발전기의 3상 평형성에 관한 연구

(A Study on 3-Phase Balance of Offshore Wind Generator with Dual Inverter System)

서장호\*

(Jangho Seo)

### Abstract

This paper shows the method of winding connection and the balance of three phase of dual inverter systems used for offshore wind power generator. In order to satisfy low cost manufacturing of large scaled wind generator, the number of slot per pole per phase should be reduced. For this reason, in this research, the number is selected as '1' which is the minimum number that stator can have. Based on the prototype machine, three types of machine for the analysis are selected, and various performances especially in terms of electrically balanced condition are also investigated. Moreover, in this paper, new inductance modeling of dual 3-phase considering cross-coupling between two inverter systems is proposed. The several inductances such as mutual-, synchronous inductances are studied. By using FEA, based on calculated the flux linkage of d and q- axis, the validity of the proposed inductance modeling is confirmed.

Key Words : Dual 3-Phase Winding, Offshore Wind Power Generator, Inductance, Permanent Magnet, FEA

### 1. 서 론

최근 화석연료 고갈문제와 지구 온난화 문제 해결을 위해 신재생에너지 관련한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중 기술의 완성도 및 경제성이 가장 앞서있는 풍력발전분야의 비중이 점차 증대하고 있는 추세이다.

\* 주저자 : 경북대학교 자동차공학부 조교수  
\* Main author : Professor, School of Automotive Engineering, Kyungpook National University  
Tel : 054-530-1408, Fax : 054-530-1409  
E-mail : j.seo@knu.ac.kr  
접수일자 : 2013년 2월 4일  
1차심사 : 2013년 3월 6일, 2차심사 : 2013년 4월 9일  
심사완료 : 2013년 4월 12일

육상풍력은 입지의 선정문제와 민원의 제기로 부지 확보에 어려움이 있어서 풍속 및 풍량이 경제성으로 유리한 해상풍력의 시장이 급성장하고 있다.

한편 발전기 타입중에서도 영구자석형은 유도형 발전기에 비해 회전자의 다극 구성이 용이하며 기어박스 없이 터빈로터에 직접 연결할 수 있어 해상풍력 발전기에 가장 적합하다[1].

해상풍력 발전기는 블레이드에 동기되어 회전하므로 저속 구동이며 높은 발전 출력(MW 급)을 발생해야 하므로 고 토크 발전기이다. 따라서 영구자석형 발전기에서도 다 극(pole)을 갖는데 유리한 표면 부착형 발전기(Surface Permanent Magnet Machine)가 대표

적인 타입이라 할 수 있다.

2중 인버터 시스템은 높은 안정적 구동을 요구하는 고속 엘리베이터, 잠수함 및 항공기등에 이용되고 있다. 한 개의 인버터가 고장이 나면 다른 한 개의 인버터로 발전기를 구동하기 때문에 출력은 반절로 줄어들지만, 고장 시에도 구동할 수 있어 안정적으로 운전해야하는 시스템에 적합하다[2-5].

또한 두 개의 상용 인버터를 그대로 적용하기 때문에 같은 출력을 갖는 한 개의 인버터를 개별적으로 이용하는 것보다 저렴하게 시스템을 구성할 수 있는 장점을 가진다.

한편 2중 인버터 시스템을 대형 풍력발전기에 적용하려면 새로운 권선방식이 필요하다. 즉, 기존의 2중 3상 권선방인 매극 매상 슬롯수(q)가 '2' 이상인 분포권 방식을 100극 이상을 요구하는 MW급 풍력발전기에 그대로 적용하면 슬롯 수가 너무 많아 제작성이 크게 떨어진다.

이러한 이유로 최근 집중권 분수슬롯(Fractional Slot Winding)을 해상용 풍력발전기에 적용하려는 노력들이 있었지만[6], 집중권 방식의 발전기는 진동 및 회전자 손실 측면이 분포권에 비해 크게 불리하기 때문에 실제 적용에는 많은 어려움이 있다[7-8].

본 논문에서는 슬롯 수를 크게 줄인 분포권 방식을 이용하여 해상 풍력발전기에 적용이 가능한 새로운 권선방식을 제시한다. 먼저 프로토타입 3상 발전기를 이용하여 대표적인 후보 3개의 권선방식을 전기적 3상 평형성에 대해서 고찰한다. 권선 방식에 따라 발전기의 성능 및 상평형성이 달라질 수 있다. 더욱이 3상 평형성을 못 갖춘 발전기는 제어가 어렵고, 소음, 진동 및 발전기 수명에 영향을 미칠 수 있으므로 3상 평형을 갖추는 일은 설계에 있어 중요한 일이다. 하지만 아직까지 2중 3상에 이용되는 권선의 상평형성을 분포권 권선방식에서 다른 연구는 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서 제안한 간략화된 권선함수를 이용하여 2중 3상 인버터 시스템용 분포권 권선방식의 상평형성을 처음으로 제시하고자 한다. FEA를 이용하여 권선 체결에 따른 상호 인덕턴스, 동기 인덕턴스 및 상 유기전압의 3상 평형성을 살펴본다. 아울러 2중 인버터 시스템간 교차 결함을 고려할 수 있는 인덕턴스

모델을 새롭게 제시하고 채교자속 계산을 통해 본 연구에서 제안된 방법의 타당성을 확인한다.

## 2. 2중 3상 인버터 시스템

2중 3상 인버터시스템은 두 개의 독립된 인버터로 전원을 공급하여 구동의 안전성을 취하고 대형 발전기의 경우 인버터 개발비용 저감이 가능한 유용한 방식이다.

그림 1은 2중 3상 인버터 시스템의 도식 도를 보여준다. 각각의 두 3상 권선이 독립적인 인버터에 의해 전원을 공급받는다.

2중 3상 인버터시스템은 두 개의 동작모드를 갖게되는데 하나는 정상동작 모드인 TSC(Two-Set Condition)과 고장 시 한 개의 인버터만 동작하는 OSC(One-Set Condition)가 있다. TSC의 경우, 그림 2와 같이 두 개의 인버터에 흐르는 전류를 위상차를 두고(6상인 경우 30도) 정상적인 정격출력을 내는 상태로 대부분의 운전모드는 여기에 해당한다. OSC는 어떠한 원인으로 고장 시 작동하는 모드로 한 개의 인버터만으로 반절의 정격 출력을 내는 상태이다.

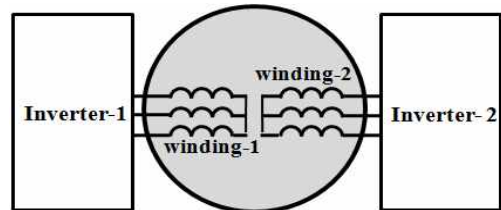


그림 1. 2중 3상 인버터 시스템의 도식도  
Fig. 1 Scheme of the dual 3-phase system

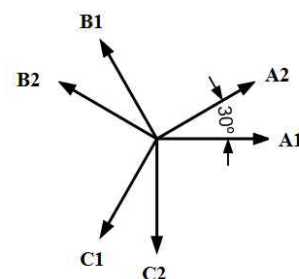


그림 2. 2중 3상 권선의 전류 벡터도  
Fig. 2. Current vector of dual 3-phase winding

예를 들어 ‘Inverter-2’가 고장이 나면 ‘Inverter-1’에 연결된 ‘winding1’에 의해 정격출력보다는 작지만 여전히 발전을 내야 한다. 이때 발생된 전압이 3상 평형이 되지 못하면 제어를 하기 어렵고 토크리플이 비정상적으로 커져 회전자를 지지하는 베어링에 손상을 줄 수 있다.

두 권선간 전류 위상각 차이는 극 수와 슬롯 수의 상관관계에서 결정되며, 2중 3상 권선이 전기적 평형(Electrically Balanced)이 되도록 결정한다. 일반적으로 이 위상각 차이는 2중 3상 권선에서 ‘0’, ‘15’와 ‘30’이 될 수 있으며 ‘30’이 주로 사용된다. ‘30’을 사용하면 TSC 동작의 경우, 정확히 6상 발전기가 되어 토크 리플의 6차 고조파 성분을 없앨 수 있어 소음 및 진동에 유리하다[10].

### 3. 2중 3상 발전기의 토크 방정식

기존의 2중 3상 발전기의 토크 방정식은 교차 결합(Cross Coupling)현상에 대한 모델링을 생략하여 간단히 표현한다. 본 연구에서는 두 권선간 및 상간 자속의 결합현상을 모두 고려한 식을 전개하여 사용하였다. 첨자1은 인버터1에 연결된 권선을 의미하고 첨자2는 인버터2에 연결된 권선을 나타낸다.

2중 3상의 d- q축 쇄교자속식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\lambda_{d1} = \lambda_{M11} + L_{d1d1}i_{d1} + L_{d1d2}i_{d2} + L_{d1q1}i_{q1} + L_{d1q2}i_{q2} \quad (1)$$

$$\lambda_{q1} = \lambda_{M11} + L_{q1d1}i_{d1} + L_{q1q1}i_{q1} + L_{q1d2}i_{d2} + L_{q1q2}i_{q2} \quad (2)$$

$$\lambda_{d2} = \lambda_{M12} + L_{d2d1}i_{d1} + L_{d2d2}i_{d2} + L_{d2q1}i_{q1} + L_{d2q2}i_{q2} \quad (3)$$

$$\lambda_{q2} = \lambda_{M12} + L_{q2d1}i_{d1} + L_{q2q1}i_{q1} + L_{q2d2}i_{d2} + L_{q2q2}i_{q2} \quad (4)$$

여기서  $\lambda_{Md1}$ ,  $\lambda_{Mq1}$ ,  $\lambda_{Md2}$  및  $\lambda_{Mq2}$ 는 자석에 의해 만들어진 d-, q축 쇄교자속량이다.  $L_{d1d1}$ 과  $L_{d2d2}$ 는 권선 1, 2의 d축 동기인덕턴스이고,  $L_{q1q1}$ 과  $L_{q2q2}$ 는 권선 1,

2의 q축 동기인덕턴스를 나타낸다.

$L_{d1d2}$ ,  $L_{d2d1}$ ,  $L_{q1q2}$  및  $L_{q2q1}$ 은 권선 1과 2사이의 상(d-q축)간 상호인덕턴스를 나타낸다. 만약 2중 3상 권선이 전기적으로 평형을 이루면  $L_{d1d2} = L_{d2d1}$ ,  $L_{q1q2} = L_{q2q1}$ 이다.  $L_{d1q1}$ ,  $L_{d2q2}$ ,  $L_{q1d1}$  및  $L_{q2d2}$ 는 교차결합 인덕턴스를 의미하며,  $L_{d1q2}$ ,  $L_{d2q1}$ ,  $L_{q1d2}$  및  $L_{q2d1}$ 는 상간 인덕턴스를 나타낸다. 만약 두 권선간 전류위상차가 ‘0’이면 이들의 값은 교차결합(Cross-Coupling) 인덕턴스를 의미하게 된다. d- q축 쇄교자속을 이용한 토크 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T = T_1 + T_2 = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \{ (\lambda_{d1}i_{q1} - \lambda_{q1}i_{d1}) + (\lambda_{d2}i_{q2} - \lambda_{q2}i_{d2}) \} \quad (5)$$

식 (5)에 표현된 토크는 다음과 같이 세분화 하여 표현할 수 있다.

$$T = T_{Mag} + T_{Self} + T_{Mutual} + T_{Cross-i} + T_{Cross-Mag} \quad (6)$$

여기서  $T_{Mag}$ 는 영구자석에 의한 정렬 토크(Alignment Torque)이고  $T_{Self}$ 는 각 권선에서 발생하는 자기 릴럭턴스 토크(Self-Reluctance Torque)이며  $T_{Mutual}$ 는 두 권선간 상호 결합에 의해 발생하는 상호 릴럭턴스 토크(Mutual-Reluctance Torque)이다.

$T_{Cross-i}$ 와  $T_{Cross-Mag}$ 는 전류와 자석에 의해 발생하는 교차결합 토크 성분이다. 식 (6)의 각 성분에 의한 토크 표현식은 다음과 같이 표현한다.

$$T_{Mag} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{M11}i_{q1} - \lambda_{M12}i_{q2}) \quad (7)$$

$$T_{Self} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \left\{ (L_{d1d1} - L_{q1q1})i_{d1}i_{q1} + (L_{d2d2} - L_{q2q2})i_{d2}i_{q2} \right\} \quad (8)$$

$$T_{Mutual} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \left\{ (L_{d2d1} - L_{q1q2})i_{d1}i_{q2} + (L_{d1d2} - L_{q2q1})i_{d2}i_{q1} \right\} \quad (9)$$

$$T_{Cross-i} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \left( L_{d1q1}i_{q1}^2 - L_{q1d1}i_{d1}^2 + L_{d2q2}i_{q2}^2 - L_{q2d2}i_{d2}^2 \right) \quad (10)$$

$$T_{Cross-Mag} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (-\lambda_{Mq1} i_{d1} - \lambda_{Mq2} i_{d2}) \quad (11)$$

영구자석이 표면 부착형으로 되어있어 d-q축 인덕턴스차이가 작다면 식 (8)에 의한 영향은 무시할 수 있다. 자석을 회전자 요크 표면에 부착하기 위해 별도의 철심판을 따로 제작하는 대형 발전기의 경우는  $T_{Scal}$ 의 영향을 고려해야 한다.

일반적으로 교차결합에 의한 자속성분은 작기 때문에 식 (9)~(11)은 무시할 수 있다. 전기장하(Electrical Loading)가 큰 발전기의 경우 자계 포화에 의한 교차결합현상이 발생하기 때문에 식 (9)~(11)을 토크 식에 포함시켜야 한다.

### 4. 2중 3상 권선 방식

본 장에서는 제작성을 높이기 위해 권선의 슬롯 수가 최소화 된 'q=1' 방식의 2중 3상 발전기의 권선 방식 및 그 특성에 관한 연구를 제시한다.

그림 3은 28극을 채용한 프로토타입 모델의 단면도를 나타낸다. 정현과 역기전력 파형을 위해 자석의 형상을 최적화하였다. 표 1은 해석 모델의 설계 사양을 나타낸다. 해석 모델은 3kW급 3상 발전기를 변형한 것으로 2중 3상 발전기로 동작시키기 위해 코일의 턴수 및 정격 전류 값을 조정하였다.

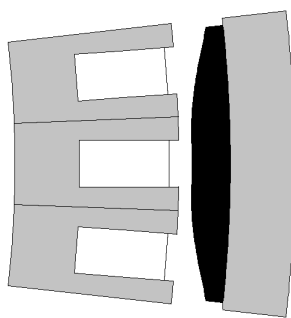


그림 3. 해석 모델의 단면도(28 극 84 슬롯)  
Fig. 3. Analysis model (28 poles 84 slots)

그림 4는 3상 및 2중 3상 발전기의 권선 배치도를 나타내었다. 첨자 1은 인버터 1( $I_{set}$ )에 연결됨을 첨자 2는 인버터 2( $I'_{set}$ )에 연결됨을 의미한다. 따라서 그림에

표시된 ' $A1$ '은  $I_{set}$ 에 연결된 A상 코일을 ' $A2$ '는  $I'_{set}$ 에 연결된 A상 코일을 의미한다.

대표적인 2중 3상권선 방식의 3가지 타입을 선택하였다. 그림 4 (a)는 일반적인 3상 발전기의 권선도를 보여주고 그림 4 (b)의 ' $Model-A$ '를 보면 슬롯의 반절위치는  $I_{set}$ 에 나머지 반절은  $I'_{set}$ 에 연결된다. 그림 4 (c)와 그림 4 (d)는  $A1$ 과  $A2$ 가 번갈아 가면서 위치한다. ' $Model-B$ '의 는  $B1$ 와  $C1$ 가  $A1$ 에 바로 옆에 연결되어 있는데 반해 ' $Model-C$ '는  $B2$ 과  $C2$ 가  $A1$ 옆에 위치한다.

표 1. 해석 모델의 설계 사양  
Table 1. Specifications of analysis model

	2중 3상
턴수/coil	60
정격전류 (A, peak)	4.12
정격 속도 (rpm)	170
극 수	28
슬롯 수	84
회전자 외경(mm)	426.4
고정자 외경(mm)	390.4
공극길이(mm)	3.0
축방향 길이(mm)	100.0

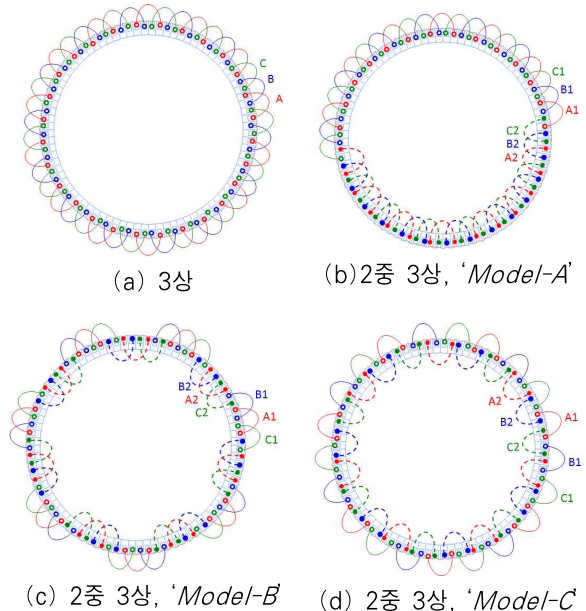


그림 4. 3상 및 2중 3상 권선의 체결도  
Fig. 4. Winding connections for analysis model

### 5. 해석 결과

‘q=1’인 2중 3상 발전기는 인버터 전류간 위상차이가 없기 때문에 TSC로 동작하면 3상으로 동작한다.

예를 들어  $I_{a1}$ ,  $I_{b1}$ ,  $I_{c1}$ 와  $I_{a2}$ ,  $I_{b2}$ ,  $I_{c2}$ 를 각각  $I_{set1}$ ,  $I_{set2}$ 에서 연결되는 상 전류라 하면,  $I_{a1}=I_{a2}$ ,  $I_{b1}=I_{b2}$ ,  $I_{c1}=I_{c2}$ 가 된다. 따라서 앞장에서 제시한 Model-A, Model-B, Model-C는 TSC동작에서 모두 같은 성능을 보여준다. 그림 5는 maxwell stress tensor을 이용하여 정격시, 모델들의 토크 특성을 보여준다. ( $i_{d1}=i_{d2}=0$ ,  $i_{q1}=i_{q2}=I_{peak}$ )

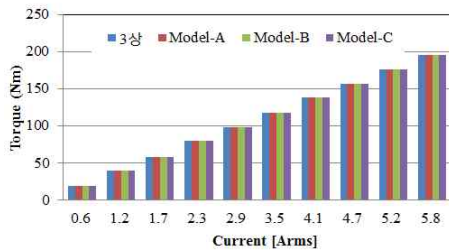


그림 5. TSC모드에서의 전류크기에 따른 토크 특성  
Fig. 5. Torque-current characteristics under TSC

OSC동작의 경우 발전기가 3상 평형상태에서 동작을 하는지 확인하기위해서 상인덕턴스 및 유기전압을 FEA를 이용해 계산하였다. 그림 6은 해석 모델의 상 인덕턴스를 표현한다. 인덕턴스 계산 시, 자계포화 특성을 고려하기 위해 FPM(Fixed Permeability Method)기법을 이용하였으며[9], 정격 동작시의 상황을 고려하고자 하였다. 오직 A1코일만 여자(excitation)시켜 계산하였다. 2중 3상 후보 권선중에서 Model-C만 상호인덕턴스  $L_{b1a1}$ 가  $L_{c1a1}$ 와 동일함을 알 수 있다.

Model-A 경우는  $L_{b1a1}$ 가  $L_{c1a1}$ 와 같지는 않지만 그 차이가 매우작음을 알 수 있다. 이와 달리, Model-B는  $L_{b1a1}$ 와  $L_{c1a1}$ 의 값의 차이가 두드러져 상 불평형(Unbalance)에 의한 영향이 세 모델 중 가장 클 수 있음을 유추할 수 있다.

그림 7은 Model-C의 상을 기준으로 계산된 모든 상호 인덕턴스 값을 보여준다. B1 코일 여자의 경우,  $L_{a1b1}$ 과  $L_{c1b1}$ 이 동일하고 C1 코일 여자의 경우  $L_{a1c1}$ 과

$L_{b1c1}$ 이 일치한다. 또한 나머지 A2, B2, C2의 상황도 동일하다. 따라서 그림의 결과로부터, Model-C는 3상 평형을 이룬다고 말할 수 있다.

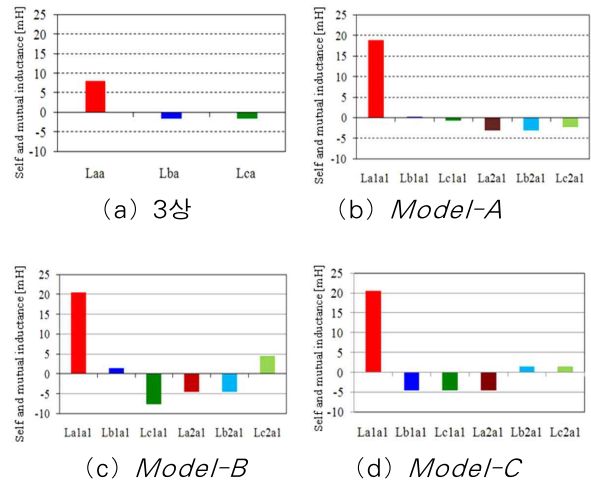


그림 6. 해석 모델의 상 인덕턴스  
Fig. 6. Phase inductance of analysis model

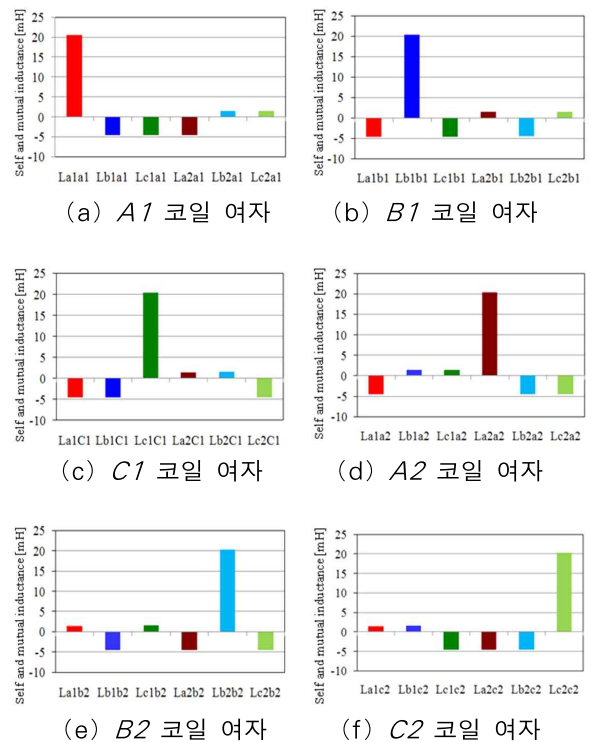


그림 7. Model-C의 상호 인덕턴스  
Fig. 7. Mutual inductances of Model-C

*Model-B*의 상호 인덕턴스의 불평형의 이유를 살펴 보기 위해 권선함수를 이용하여 알아본다. 공극에서의 단위 전류당 기자력(Magnetomotive force, MMF)은 권선함수(Winding function)으로 표현할 수 있다.

$$F(\theta) = N(\theta) \tag{12}$$

여기서  $F$ 와  $N$ 은 위치에 따른 MMF와 권선함수이다. 그림 8은 *Model-B*의 상호 인덕턴스 계산법을 나타낸다. 굵은 검은색 선은  $A1$ 코일에 의해 생성된 MMF이며, 붉은색 점근선은 각각  $B1, C1, A2, B2, C2$  코일의 MMF이다.

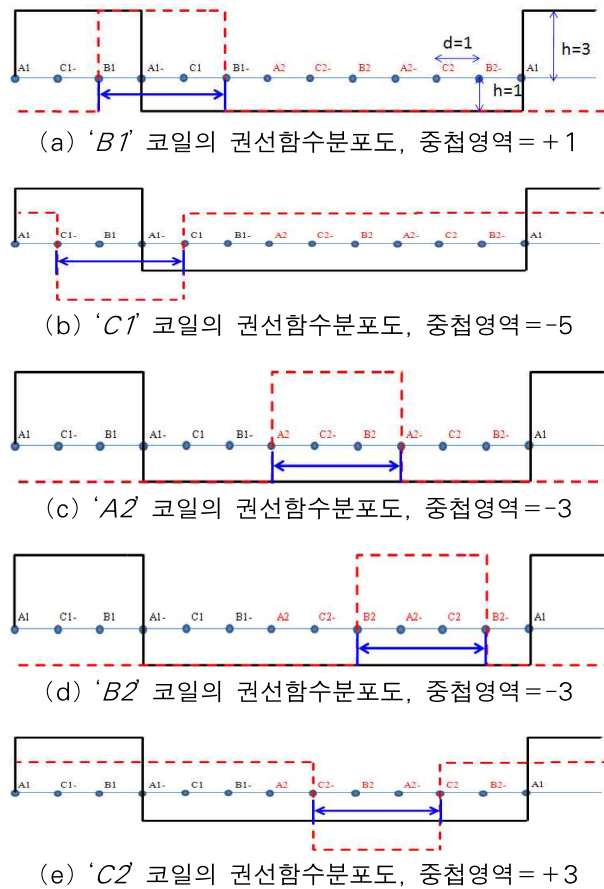


그림 8. *Model-B*의 권선 함수의 분포도  
Fig. 8. Winding function distribution of *Model-B*

점선과 점근선 사이의 중첩된 부분의 영역을 계산하면 상호인덕턴스를 계산할 수 있다. 실제 모델에서는

슬롯 개구폭, 턴 수, 병렬 수, 비선형성 등 여러 가지 파라미터를 고려하여 계산해야 정확한 값을 유도할 수 있다. 하지만 상호 인덕턴스의 상 평형 관련해서는 파라미터를 간략히 축소하여 쉽게 판단가능하다.

슬롯 사이의 거리  $d$ 를 '1',  $A1$ 코일의 정방향 높이  $h$ 를 '3'이라고 하면 역방향 높이  $h$ 는 1로 계산할 수 있다. 이를 기반으로 *Model-B*의 중첩된 영역의 넓이 비율은 +1: -5: -3: -3: +3이며 이는 그림 6 (c)의 결과와 일치한다.

' $A1$ ' 코일을 여자 시켰을 때의 자속밀도 분포도를 그림 9에 제시하였다. *Model-A*를 보면, 자속이  $I_{set}$  권선과  $2_{set}$  권선이 만나는 양끝단에서 집중함을 알 수 있으며 *Model-B*와 *Model-C*는  $A1$ 코일이 원주방향으로 균등하게 분포하여 자속이 균등하게 분포함을 알 수 있다.

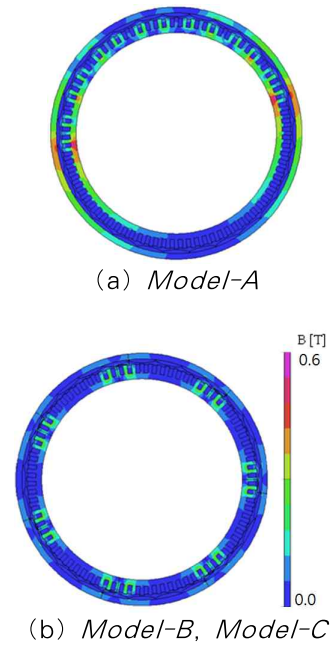


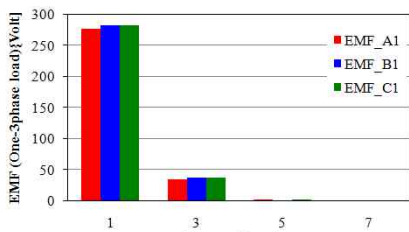
그림 9. 자속밀도 분포 ( $A1$ 코일 여자,  $I_{a1}=I_{peak}$ ,  $I_{b1}, I_{c1}, I_{a2}, I_{b2}, I_{c2}=0$ )  
Fig. 9. Flux density distribution

따라서 *OSC*동작의 경우, *Model-A*는 고정자 요크의 자기 포화로 인해 성능이 감소될 수 있음을 유추할 수 있다. 해석결과 약 2%의 토크감소를 확인할 수 있었다. 만약 소형 모델이 아닌 전기 장하가 큰 MW급

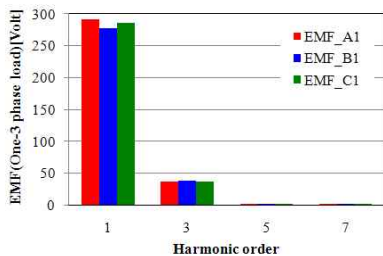
모델의 경우라면 토크 저감의 정도는 더 크리라 예상 된다.

OSC동작 상황에서 유기전압의 3상 평형을 알아보기 위해 FEA를 이용하여 계산하였으며 파형의 고조파 분석을 그림 10에서 보여준다. 이때,  $2_{set}$ 의 동작은 없다고 가정한다. 그림 10의 결과를 보면 *Model-C*만 유기전압의 피크값이 서로 일치함을 알 수 있다.

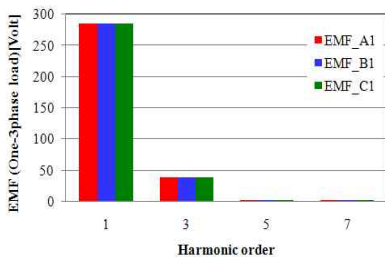
그림 11은 *Model-C*의 동기 인덕턴스로 본 연구에 서제안한 토크식 (8)-(11)에서 사용된다. D-q변환을 이용한 d,q축 동기 인덕턴스는 3상 평형이라는 가정을 필요로 한다. 따라서 엄밀한 의미에서 3상평형을 유일하게 보여주는 *Model-C*의 인덕턴스만 의미를 가질 수 있다.



(a) *Model-A*



(b) *Model-B*



(c) *Model-C*

그림 10. OSC상황에서의 상유기전압  
Fig. 10. Induced phase voltage under OSC

그림에서 보여주듯이,  $L_{d1d2} = L_{d2d1}$ ,  $L_{q1q2} = L_{q2q1}$ 이므로 전기적 3상 평형을 이루고 있음을 알 수 있다. 또한 d-q축 자로의 자기저항이 같아  $L_{d1d1} = L_{d2d2} = L_{q1q1} = L_{q2q2}$ 이 된다. 교차 결합에 해당되는 나머지 인덕턴스 값은 무시할 만큼 작으므로 해석모델의 자체적 포화의 영향은 작다.

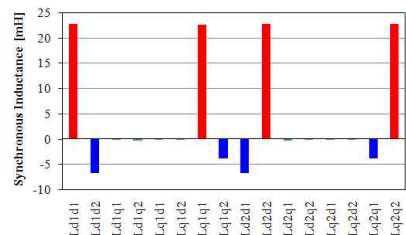
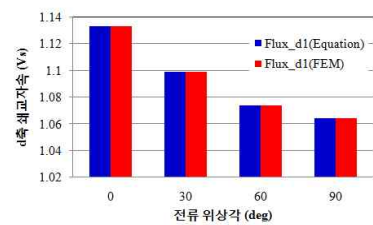
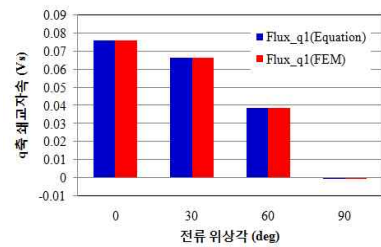


그림 11. *Model-C*의 동기 인덕턴스  
Fig. 11. Synchronous inductance of *Model-C*

제안된 인덕턴스 모델링의 검증은 위해 d-, q축 쇄교자속을 FEA를 통해 계산하고 식 (1)~(4)의 값과 비교하여 그림 12에 제시한다. 그림에서 알 수 있듯이, 인덕턴스를 이용한 쇄교자속과 FEA를 통해 얻은 값이 잘 일치함을 알 수 있다.



(a) d축 쇄교자속



(b) q축 쇄교자속

그림 12. *Model-C*의 쇄교 자속비교  
Fig. 12. Comparison result of flux linkage for *Model-C*

## 6. 결 론

본 논문은 분포권 권선을 이용하여 2중 3상 인버터를 갖는 해상용 풍력발전기의 설계를 위한 권선 체결 및 3상 평형성을 제시하였다. 기존의 2중 3상 권선 방식의 연구는 집중권 방식을 이용하여 소형전동기 분야에만 다루었지만, 집중권 권선이 갖는 고조파 특성(높은 토크 리플, 저효율, 소음, 진동)으로 인해 대형전동기로의 적용은 어려운 실정이었다. 한편 분포권 권선은 슬롯 수를 많이 사용하여 대형발전기의 제작성을 크게 떨어뜨리는 단점을 가진다.

이러한 이유로 본 연구에서는 슬롯수가 최소화된 분포권 방식을 이용하여 대형 풍력발전기의 설계 기술을 마련하고자 하였다. 간략화된 권선함수를 이용하여 3상 평형을 갖춘 분포권 권선 모델을 최초로 제시하였다.

유한요소법을 이용하여 한 개의 인버터 동작(고장 모드)시에도 유기전압이 3상 평형성을 유지하는지 살펴보았다. 해석 결과 한 개의 권선 방식만(*Model-C*)이 균형을 보여주었다. 또한 두 개의 인버터간 교차결합 현상을 고려할 수 있는 2중 3상 발전기의 인덕턴스 모델링을 새롭게 제시하였고 FEA를 통해 타당성을 검증하였다.

이 논문은 2012학년도 경북대학교 신입교수 정착연구비에 의하여 연구되었음.

## References

[1] Hui Li, Zhe Chen, and Henk Polinder, "Optimization of Multibrid Permanent-Magnet Wind Generator Systems," IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 24, No. 1, March 2009.

[2] Aldo Boglietti, Radu Bojoi, Andrea Cavagnino, and Alberto Tenconi, "Efficiency analysis of PWM inverter fed three-phase and dual three-phase high frequency induction machines for low/medium power applications" IEEE Trans. Industrial electronics, Vol. 55, No. 5, May 2008.

[3] Alberti Luigi and Bianchi Nicola, "Impact of winding arrangement in dual 3-phase induction motor for fault tolerant applications," in IEEE International Conference on Electrical Machines, 2010.

[4] Alberti Luigi and Bianchi Nicola, "Experimental Tests of Dual Three-Phase Induction Motor Under Faulty Operating Condition," IEEE Trans. Industrial electronics, Vol. 59, No. 5, May 2012.

[5] Miller, T.J.E. and McGilp, M.I. "Analysis of multi-phase permanent-magnet synchronous machines," in IEEE International Conference on Electric Machines and Systems, 2009.

[6] M. Barcaro, N. Bianchi, and F. Magnussen, "Six-phase supply feasibility using a PM fractional-slot dual winding machine," IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 47, No. 5, Sep. 2011.

[7] N. Bianchi, S. Bolognani, and E. Fornasiero, "An overview of rotor losses determination in three-phase fractional-slot PM machines," IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 46, No. 6, Nov. 2010.

[8] K. Atallah, D. Howe, P. H. Mellor, and D. A. Stone, "Rotor loss in permanent-magnet brushless AC machines," IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 36., No. 6, Nov. 2000.

[9] Sang-Yeop Kwak, Jae-Kwang Kim, and Hyun-Kyo Jung, "Characteristic analysis of multilayer-buried magnet synchronous motor using fixed permeability method," IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 20., No. 3, Sept. 2005.

[10] T. J. E. Miller and M. I. McGilp, "Analysis of multi-phase permanentmagnet synchronous machines," in Proc. Int. Conf. Elect. Mach. Syst., Nov. 2009.

## ◇ 저자소개 ◇



### 서장호 (徐章皓)

1978년 4월 11일생. 2003년 중앙대학교 전자전기공학부 졸업. 2010년 서울대학교 대학원 졸업(박사). 2010년 3월~2010년 7월 서울대학교 BK21 연구원. 2010년 7월~2012년 6월 The University of Sheffield Research Associate. 2012년 9월~현재 경북대학교 자동차 공학부 조교수.