

# 이중 3상 시스템과 모듈러를 갖는 MW급 해상용 풍력발전기의 무정지 기능을 위한 권선 체결방식에 관한 연구

## Investigation of Winding Connections for Fault-Tolerant of MW Class Offshore Wind Generator with Dual 3-Phase System and Modular

서 장 호\*  
(Jang Ho Seo)

**Abstract** - This paper presents a new winding topology for MW class offshore wind generator having modular and dual 3-phase. Based on proposed simplified relationship between magnetic flux and phase current in the air gap, several new windings for modular and dual 3-phase are made. In case of one inverter operation or faulty operation, the proposed model can have balanced 3-phase induced voltage whereas the conventional generator with modular winding has unbalanced induced voltage, which can be important issue in offshore generator. The model was applied into 6MW prototype machine with dual 3-phase. Using finite element analysis, induced voltage, inductance were investigated. The results show that the proposed modular winding can be applicable to dual inverter system with electrically balanced voltage.

**Key Words** : Dual 3-phase, PM machine, Modular winding

### 1. 서 론

오늘날 지하자원의 고갈 및 일본의 원전 사고로 신재생에너지의 관심이 어느 때보다 커지고 있으며 그 후보 중에서도 풍력발전은 대체에너지로서 경제성 및 기술의 완성도가 가장 높아 공급비중이 빠르게 증가하고 있다.

해상 풍력은 육상에 비해 장애물이 적고 설치장소의 제약 조건이 적은 해상에 설치하여 지속적이고 강한 풍력을 이용하여 많은 전력을 얻는 에너지 공급시스템이다. 또한 대형 터빈 설치가 가능하며 대단위 풍력단지를 조성하기 용이한 반면 유지보수 비용이 많이 소요된다. 해안에서 멀어질수록 비용이 증가하고 유지보수가 쉽지 않아 제품의 신뢰성이 상대적으로 높아야 하므로 기어가 없는 직결구동(Direct Drive)방식을 주로 채택한다. 직결구동방식은 블레이드와 발전기 사이의 증속기를 제거하여 구조가 간단하고 유지보수 측면에서 유리하다.

발전기 타입으로는 블레이드와 동기화되어 저속으로 돌아가는 구조이고 높은 발전 출력을 보장해야 하므로 저속 고투출 전동기가 적합하다. 따라서 다 극(100극 이상)을 부착하는데 유리한 표면 부착형 전동기(Surface Permanent Magnet Machine)가 적합하다고 할 수 있다. 전동기 타입은 회전자위치의 바깥 혹은 안쪽 유무에 따라 내전형(Inner Rotor) 과 외전형(Outer Rotor)타입으로 나눌 수 있는데 외전형 타입이 동일 두께 자석으로 높은 출력밀도를 가진다고

알려져 있다.

한편, 이중(Dual) 인버터 시스템은 제품의 무정지 기능(Fault Tolerant)을 확보하기 위해서 이용되는 방식으로 주로 항공기, 배, 고속 엘리베이터 등에 이용된다. 두 개의 인버터를 이용하므로 한 개의 권선 혹은 인버터가 고장이 나면 나머지 인버터로 전동기를 여전히 구동시킬 수 있어 제품의 안정적 구동에 유용하다[1]-[4].

이를 풍력발전기에 적용하면, 고장 시에도 여전히 발전 출력을 확보할 수 있어 유지보수가 어려운 해상용 풍력시스템에 적합하다고 할 수 있다. 또한 이중 인버터 시스템은 발전기의 가격을 줄이는데 도움이 된다. 예를 들어 6MW급 발전기를 개발하기 위해 6MW 인버터를 새롭게 개발할 필요 없이 상용 3MW 인버터 두 개를 이용하면 저렴하게 6MW 발전기 시스템을 구현할 수 있다.

해상풍력 발전기와 같은 대형 전동기의 경우 제작성을 고려한 설계가 매우 중요해진다. 저속 구동에 맞춰 극수를 증가시키수록 그에 대응하는 코일 수가 증가하여 코일 엔드부분을 처리하기가 매우 어려워진다. 따라서 슬롯 수를 최소화시킬 수 있는 새로운 설계 패러다임이 필요하다.

이와 비슷한 맥락으로 모듈화 기법이 새롭게 주목받고 있다. 모듈화 기법이란 그림 1에서 보여준 것처럼, 세그먼트 단위의 고정자에 코일을 미리 감아놓고 이러한 동일한 구조를 갖는 여러 개의 세그먼트들을 조립하여 전체 고정자를 만드는 공정기법을 의미하며 소형 전동기의 제작이 널리 쓰이고 있다.

그림 1에서는 3개의 세그먼트로 고정자를 조립하는 예를 보여준다. 각 세그먼트에는 코일이 동일한 방식으로 감겨져 있음을 알 수 있다.

이와 같은 이유로 이중 3상 인버터시스템의 구현 및 전동

\* Corresponding Author : School of Automotive Engineering,  
Kyungpook National University, Korea  
E-mail : j.seo@knu.ac.kr

Received : February 27, 2013; Accepted : June 12, 2013

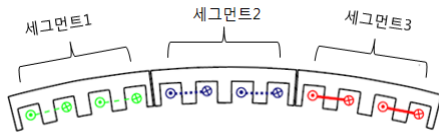


그림 1 집중권을 이용한 모듈화 개념

Fig. 1 Concept of modular technique based on non-overlapping winding

기의 제작성을 높이기 위해 집중권선을 이용하려는 노력이 있었지만[3]-[6], MMF(Magnetomotive force)의 고조파 성분에 의한 진동, 소음 및 손실이 크게 발생하여[7][8] 풍력 발전기와 같은 대형 전동기에 적용하기는 어려운 실정이다.

본 논문은 분포권을 이용하여 이중 3상 인버터 시스템용 모듈러 방식을 최초로 구현한다. 제작성을 향상시키고자 슬롯수가 최소화된 극대상 슬롯수  $q$ 를 '1'로 설정하였다. 풍력발전기의 무정지 기능을 구현하기 위해 기자력(Magnetomotive Force)함수에 기반을 두어 다수의 후보 모델('MDE': Modular Dual 3-phase and Electrically balanced)을 제시한다. 또한 이중 인버터 시스템을 갖지만 무정지 기능은 없는 한 개의 모델('MD':Modular Dual 3-phase)을 제시하고 모델들 간의 상 평형성을 검토한다. 유한요소법(Finite Element Analysis: FEA)를 이용하여 상호 인덕턴스, 동기 인덕턴스 및 유기전압 파형 등을 해석하여 본 연구의 타당성을 검증한다.

## 2. 이중 3상 인버터 시스템

두 3상 각 권선들이 독립적인 인버터 두 개와 각각 연결되어 있는 이중 3상 인버터 시스템의 구조를 그림 2에서 보여준다.

이중 3상 인버터의 동작모드는 동작하는 인버터의 개수에 따라 달라지는데, 두 개의 인버터가 동시에 동작을 하는 'TSC (Two-Set Condition)과 한 개의 인버터만으로 동작을 하는 'OSC (One-Set Condition)가 있다.

TSC는 전동기의 정상 동작 (Normal Operation) 상황을 의미하며 그림 3에서 제시한 두 3상간 전류 위상각 차이 ' $\alpha$ '에 따라 성능차이가 발생한다. 두 권선간 전류 위상각 차이는 극 수와 슬롯 수의 상관관계에서 결정되며,  $\alpha$ 값이  $30^\circ$ 이거나  $15^\circ$  이면 6상 전동기로 동작하게 되고 MMF의 공간고조파 성분이 크게 줄어 토크리플을 줄일 수 있다[9][10]. 이러한 경우 분포권을 기준으로 매극 매상슬롯수 ' $q$ '가 2 이상이어야 하므로 대형전동기에는 제작이 어려워져 적합하지 않다. 본 연구에서 사용하는 슬롯수가 최소화된 ' $q=1$ '인 경우는  $\alpha$ 값이  $0^\circ$ 이 되고 이때 인버터에 흐르는 대응하는 상전류는 서로 일치한다.

OSC는 권선의 일부 혹은 한 개의 인버터가 고장이 난 상태(Fault Operation)를 의미하며 해상 풍력발전기는 보수(Repair)를 기다리며 여전히 출력을 내야하는 상황이다. 이때 전동기는 3상으로 동작하고 출력은 정격의 반절이 된다. 이때 발생 전압이 3상 평형을 이루지 못하면 제어가 어렵고 효율이 떨어지며 소음 및 진동이 급격히 커질 수 있다. 따라서 해상풍력발전기가 무정지 기능을 갖기 위해선, OSC상태에서 3상 전압의 평형이 반드시 유지되어야 한다. 상 인

덕턴스 혹은 동기 인덕턴스를 검토하면 모델의 3상 평형성 유무를 쉽게 판단할 수 있다.

본 연구에서는 두 권선간 및 상 간 자속의 결합현상을 모두 고려한 식을 전개하여 사용한다. 첨자1은 인버터1('1set')에 연결된 권선을 의미하고 첨자2는 인버터2('2set')에 연결된 권선을 나타낸다.

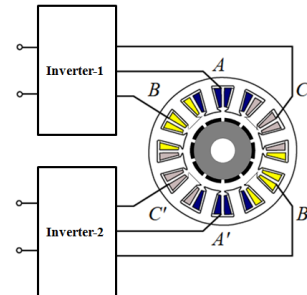


그림 2 이중 3상 인버터 시스템의 구조

Fig. 2 Scheme of the dual 3-phase system

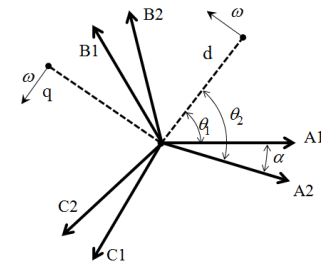


그림 3 이중 3상 권선의 전류 벡터도

Fig. 3 Current vector of dual 3-phase winding

이중 3상의 d- q축 쇄교자속식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\lambda_{d1} = \lambda_{Md1} + L_{d1d1}i_{d1} + L_{d1d2}i_{d2} + L_{d1q1}i_{q1} + L_{d1q2}i_{q2} \quad (1)$$

$$\lambda_{q1} = \lambda_{Mq1} + L_{q1d1}i_{d1} + L_{q1q1}i_{q1} + L_{q1d2}i_{d2} + L_{q1q2}i_{q2} \quad (2)$$

$$\lambda_{d2} = \lambda_{Md2} + L_{d2d1}i_{d1} + L_{d2d2}i_{d2} + L_{d2q1}i_{q1} + L_{d2q2}i_{q2} \quad (3)$$

$$\lambda_{q2} = \lambda_{Mq2} + L_{q2d1}i_{d1} + L_{q2q1}i_{q1} + L_{q2d2}i_{d2} + L_{q2q2}i_{q2} \quad (4)$$

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 동기 인덕턴스이고,  $L_{q1q1}$ 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, 이중 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 이 들의 값은 교차결합(Cross-Coupling) 인덕턴스를 의미하게 된다.

### 3. 제안된 모듈러 권선

본 장에서는 이중3상 인버터 시스템을 가진 6MW급 풍력 발전기(Modular Dual 3-phase, 'MD' :기준타입)를 소개하고 이를 기반으로 OSC상태에서도 3상평형을 이루는(=무정지 기능을 갖춘) 새로운 모듈러 권선(Modular Dual 3-phase and Electrically balanced, 'MDE')을 구현한다.

본 논문을 통해 처음으로 시도되는MD와 MDE는 분포권 기반의 모듈러 권선 방식 혹은 그 권선 방식을 채택한 전동기라는 뜻을 알려준다. 기준타입인 MD는 이중 인버터용이지만 OSC인 경우에 발전전압이 3상 평형이 어려운 타입이다(=무정지 기능 불능). 즉, 한 개의 권선이나 한 개의 인버터가 고장이 발생하는 경우, 제어가 어려워 보수할 때까지 기능을 정지시켜야한다. 이와 달리 MDE는 OSC상태인 경우에도 유기전압이 3상평형을 이루며 보수가 될 때까지 여전히 발전출력이 가능하다.

전동기의 기본적인 설계사양은 표 1에 제시하였다. 외전형타입으로 고정자 바깥에 회전자가 블레이드에 직결되어 회전하는 구조이다. 다극 채택에 유리한 SPM타입을 적용하였으며 자석의 형상은 감자(Demagnetization) 내력, 역기전력 파형 개선, 코깅 및 토크리플 저감을 고려하여 최적설계되었다. 코일 분포의 제작성을 향상시키기 위해 q=1을 선택하였다.

그림 4는 분포권 방식에서 사용되는 상(Phase) 코일의 극(혹은 벡터)을 표시한다. 그림 4(a)은 전형적인 3상 분포권 형태로서 'A', 'B', 및 'C' 코일이 전기각 120도 간격으로 분포하고 코일이 서로 중첩됨을 알 수 있다. 특히 양 끝단에서 코일이 연속적으로 옆 위치 코일과 중첩되어 존재하므로 그림 1와 같은 모듈화가 불가능함을 알 수 있다.

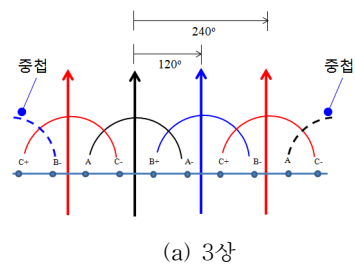
한편, 그림 4(b)는 모듈러 3상의 코일 배치도를 나타내는 것으로, 그림 4(a)의 'C'코일 체결만 다르게 연결하여 여전히 상 간 전기각 120도를 유지하고 슬롯의 양 끝단 위치에서 코일 중첩이 없음을 알 수 있다. 따라서 그림 1에서 보여준 집중권을 이용한 모듈화가 그림 4(b)를 기반으로 한 분포권에서도 가능할 수 있음을 알 수 있다.

기준 타입(MD)의 한 개 세그먼트의 권선 체결도를 그림

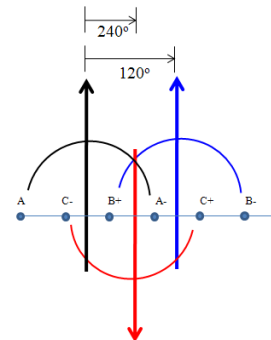
5에 제시한다. 그림 4(b) 타입을 3개씩 직렬로 연결한 것으로, 슬롯의 왼쪽은 인버터1('1set')에 연결됨을 나머지 오른쪽은 인버터2('2set')에 연결됨을 나타낸다.

한편, 전동기의 유기 전압이 3상 평형(Phase Balance)을 유지하는지 확인하기 위한 가장 명확한 방법은 상호인덕턴스 값이 같은지 여부를 판단하는 것이다. 그림 6은 본 연구에서 제안하는 간략화 된 일반적인 3상 전동기의 'A'코일 여자에 의한 'B' 와 'C'코일의 상호 인덕턴스 (Mutual Inductance)계산법을 보여준다.

그림 6(a)는 A코일 여자에 의한 자속밀도 분포(또는 MMF)를 보여주며 양과 음(또는 위아래)의 영역이 서로 같음을 알 수 있다. A코일에 의한 B코일 쇄교자속 (Flux Linkage)은 그림 6(b)와 같이 B코일의 극(Polarity)를 고려하여 서로 중첩되는 영역을 계산하면 구할 수 있다.



(a) 3상



(b) 모듈러 3상

그림 4 분포권선의 상 코일의 극

Fig. 4 Polarity of phase coil for overlapping winding

표 1 발전기의 설계사양

Table 1 Specification of generator

블레이드 직경	m	154
전압	V	690
평균 바람 속도	m/s	9.8
슬롯 수	-	432
극 수	-	144
고정자 외경	mm	6255
회전자 외경	mm	6850
정격 속도	rpm	11
정격 출력	MW	6
자석의 잔류 자속밀도	T	1.3

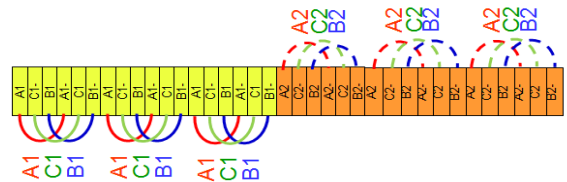


그림 5 프로토타입 전동기(MD)의 권선 체결도

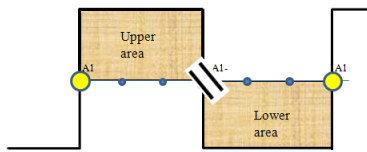
Fig. 5 Winding connection of prototype with MD

$\phi_i$ 는 공극을 통해 B코일로 들어가는 자속량(Flux)을  $\phi_o$ 는 나가는 자속량을 의미한다. A에 의한 B코일의 쇄교자속은 다음 식을 통해 얻을 수 있다.

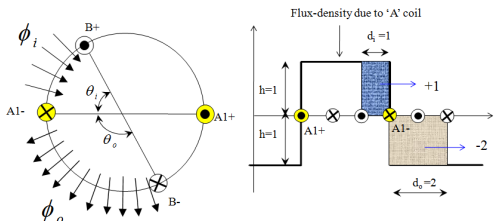
$$\Psi_{BA} = N_B L_{stk} r [B_i \theta_i + B_o \theta_o] \quad (5)$$

여기서,  $N_B$ 는 B코일의 턴 수를  $r$ 는 공극 중간까지의 반지름을  $L_{stk}$ 는 축방향 길이를 나타낸다.  $B_i$ 와  $B_o$ 는  $\phi_i$ 와  $\phi_o$ 에 각각 대응하는 공극자속밀도 값이고  $\theta_i$ 와  $\theta_o$ 는  $\phi_i$ 와  $\phi_o$ 에 각각 대응하는 각도를 나타낸다.  $\Psi_{CA}$ 도 (5)를 통해 얻을 수 있다. 상호인덕턴스는 단위 전류당 쇄교자속값으로 표현된다. 정확한 상호인덕턴스 계산을 위해서는 슬롯의 개구(Slot Opening) 폭 및 자기회로의 비선형성을 추가하여 고려해야 하지만 치수를 간략히 한다면 상의 평형성의 유무를 쉽게 판단내릴 수 있다.

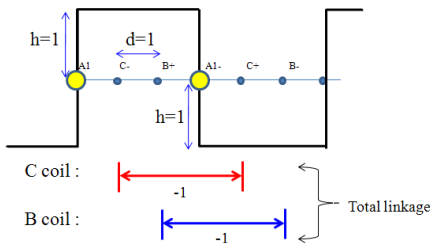
그림 6(b)를 보면, A코일에 의한 공극 자속밀도의 크기, 코일의 턴 수, 축 길이 및 코일 간격의 크기를 간략히 '1'로 표현하여 중첩된 면적을 '+1'과 '-2'로 표현하였다. 따라서  $\Psi_{BA}$ 는 이 두 값의 합인 '-1'로 표현할 수 있으며 마찬가지로  $\Psi_{CA}$ 도 그림 6(c)에서와 같이 '-1'로 나타낼 수 있다. 따라서 전형적인 3상 전동기의  $\Psi_{BA}$ 와  $\Psi_{CA}$ 는 값이 '-1'로 서로 같기 때문에 상평형을 이룬다고 말할 수 있다.



(a) 'A'코일 여자에 의한 MMF(또는 자속밀도) 분포



(b) 'A'코일 여자에 의한 'B'코일의 쇄교자속



(c) 'A'코일 여자에 의한 'B'와 'C'코일의 중첩 면적

그림 6 3상 권선의 'A'코일에 의한 중첩 면적 계산

Fig. 6 Calculation of overlapping region in conventional 3-phase winding based on 'A' coil excitation

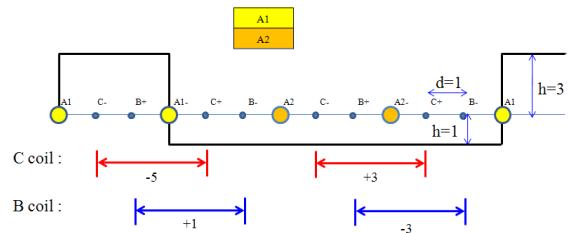
본 연구에서는 그림 6(c)에서 보여준 동일한 방법으로 치수를 간략히 하여 OSC상태에서도 상의 평형성을 갖는 모듈러 이중 3상용 권선 체결법을 찾고자 하였다.

MDE를 위한 B, C코일의 위치에 따른 중첩된 면적(=쇄교 자속량)을 그림 7에서 보여준다. 먼저 'A'상 코일들의 위치를 미리 결정지어 놓은 다음, 인버터2에 연결된 A코일('A2')의 전류를 '0'로 놓고 인버터1에 연결된 A코일('A1')

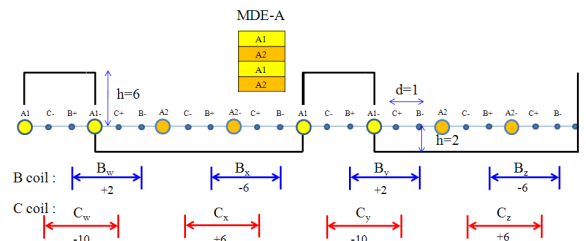
여자를 시킨다. 이때 B와 C코일은 아직 인버터 연결이 결정되어 있지 않은 상태이다. B와 C코일의 적절한 조합에 의한 중첩된 총 면적(=쇄교 자속량)이 그림 6(c)와 같이 서로 일치한다면 이 권선은 OSC상태에서 상평형을 이룬다고 말할 수 있다.

그림 7(a)는 12슬롯을 한 개의 세그먼트 단위로 이용하는 'A1A2'타입을 보여준다. A1을 기준으로 중첩된 면적을 계산하므로 검은 선은 A1 여자에 의해 발생된 MMF(또는 자속 밀도)파형이다. 이때, B코일이 가질 수 있는 값은 '+1'과 '-3'이며, C코일이 나타낸 값은 '-5'와 '+3'이다. '+1'을 나타내는 B코일 위치에 B1을 선택하거나 '-3'을 나타내는 위치에 B1을 놓아도 이와 대응하여 같은 값을 가지는 C1코일을 찾을 수 없으므로 'A1A2'으로는 OSC상태에서 상평형을 가질 수 없다.

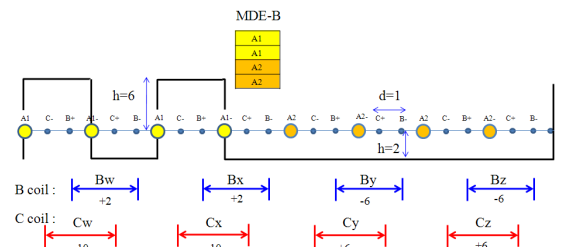
그림 7(b)는 'A1A2'를 두 배 중첩한 모델인 'A1A2A1A2'('MDE-A')를 보여준다. B와 C코일의 위치는 4개씩이고 B의 경우 '+2', '-6', '+2', '-6'이며 C는 '-10', '-10', '+6', '+6'의 면적 값을 보여준다. 이 경우, 두 개의 B의 위치를 B1으로 선택하여 총 면적을 '-4'놓으면 이와 같은 값을 가지는 C1의 위치를 선택할 수 있다. 예를 들어, 'Bw'와 'Bx'를 B1으로 직렬로 연결해 놓으면 'Cw'와 'Cy'를 C1으로 선택하여 쇄교자속량이 '-4'가 되어 서로 같아진다. 그림



(a) 'A1A2' 타입



(b) 'A1A2A1A2'타입('MDE-A')



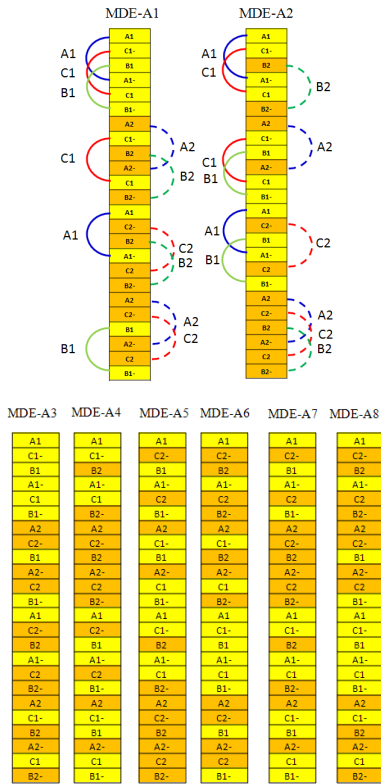
(c) 'A1A2A1A2'타입('MDE-B')

그림 7 모듈러 이중 3상 권선의 'A'코일에 의한 중첩 면적

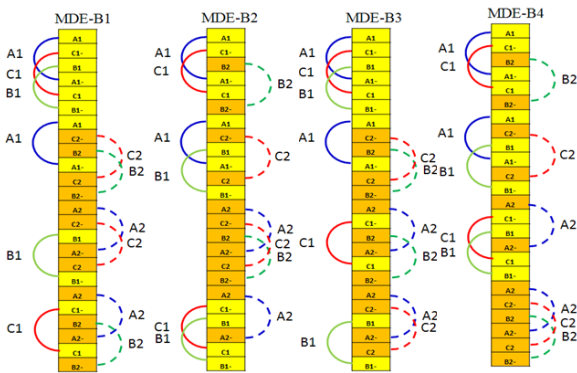
Fig. 7 Overlapping coil region in modular dual 3-phase winding based on 'A' coil excitation

7(c)는 'A1A1A2A2'(MDE-B)타입을 선택할 경우의 B와 C 코일의 면적값을 나타낸다. 그림 7(b)와 마찬가지로 방법론 총 면적 값을 '-4'를 가지는 조합을 찾을 수 있다.

MDE-A와 MDE-B에는 B와 C코일의 상평형 가능한 여러 개의 위치조합이 존재하는데 이를 그림 8에 제시한다.



(a) MDE-A 타입



(c) MDE-B 타입

그림 8 MDE의 권선 체결도

Fig. 8 Winding connection of MDE

#### 4 해석결과

본 논문에서 제안된 체결법을 갖는 발전기 MDE의 타당성을 확인하기 위해 유한 요소법을 이용하여 인덕턴스 및 OSC에서의 유기전압파형을 검토하였다. 이때, OSC의 상황

은 인버터 1은 동작하고 인버터 2는 고장이라고 가정하였다. 해석에 사용된 입력 전류의 크기는 정격 전류(Ipeak)를 이용하였다.

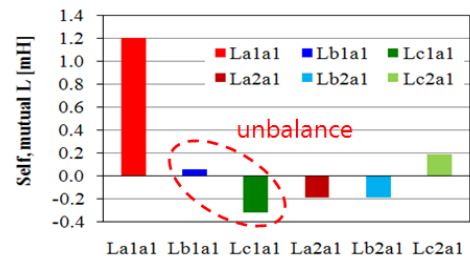
'A1'상 코일을 여자시키고 나머지 상코일에 쇄교하는 자속량을 유한요소법으로 구하여 상인덕턴스를 계산하였다. La2a1, Lb2a1, Lc2a1은 인버터 1의 A상 코일을 여자시켰을 때의 인버터 2의 A, B, 및 C상 코일의 상호 인덕턴스를 나타낸다. 마찬가지로, Lal1, Lbl1a1 및 Lcl1a1은 인버터 1의 A상 코일을 여자시켰을 때의 인버터 1의 A, B, 및 C상 코일의 상호 인덕턴스이다.

그림 9(a)는 MD에 관한 결과를 보여주는데, Lbl1a1과 Lcl1a1이 서로 같지 않아 상평형을 이루지 못한다고 말할 수 있다. 주의할 점은 인버터 2가 동작을 못하는 상태라고 가정하기 때문에 La2a1, Lb2a1 및 Lc2a1은 검토 대상이 아니다. 반대로, 인버터 1이 고장이 나고 인버터 2가 동작하고 있다고 가정한다면, Lb2a2 과 Lc2a2의 값을 검토해야 할 것이다.

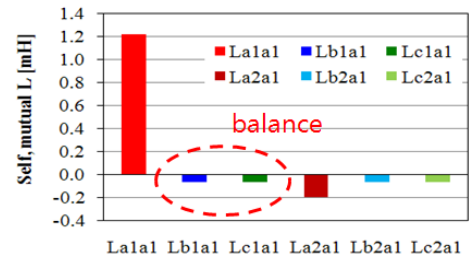
이와 달리, 제안된 체결법(MDE)의 상호인덕턴스 Lbl1a1과 Lcl1a1이 서로 일치함을 알 수 있으며, 이때, MDE-A나 MDE-B에 따른 인덕턴스 차이가 없었던 이유는 그림 7에서 보여준 상호 쇄교자속량이 서로 같았기 때문이다. 해석의 간편성을 위해, 제시된 여러 개의 MDE 타입 중에서 1개씩만 선택하여 비교하였다.

모델에 따른 동기인덕턴스 비교 결과를 그림 10에 제시하였다. 하지만, 모델 모두  $L_{d1d2} = L_{d2d1}$ ,  $L_{q1q2} = L_{q2q1}$  임을 보여주고 있기 때문에 동기인덕턴스 값으로는 3상 평형성을 검토할 수 없었다.

그림 11는 TSC에서의 상 유기전압 특성을 보여준다. 모델에 상관없이 TSC상태에서는 모두 같은 자계조건이 된다. 왜냐하면, q=1인 상태에서 인버터 전류 위상차는 '0'이므로  $I_{a1}=I_{a2}$ ,  $I_{b1}=I_{b2}$ ,  $I_{c1}=I_{c2}$ 가 성립하여 두 인버터를 모두 동



(a) MD



(b) MDE (MDE-A, MDE-B)

그림 9 상 인덕턴스의 비교

Fig. 9 Comparison results of phase inductance



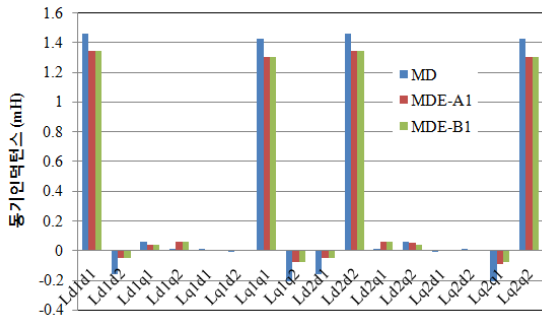
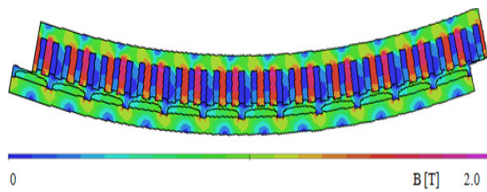
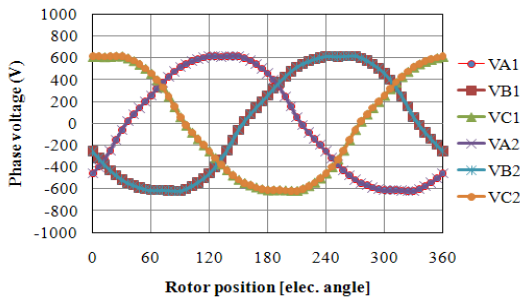


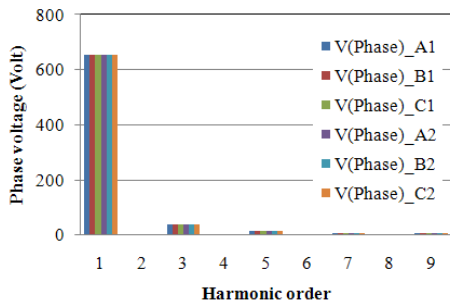
그림 10 동기 인덕턴스의 비교  
Fig. 10 Comparison results of synchronous inductance



(a) 자속밀도 분포



(b) 유기전압 파형

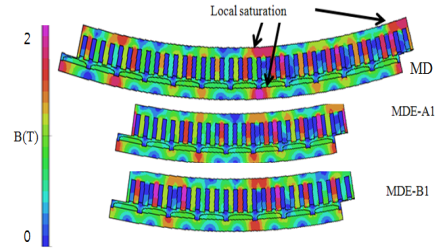


(c) 유기전압 고조파

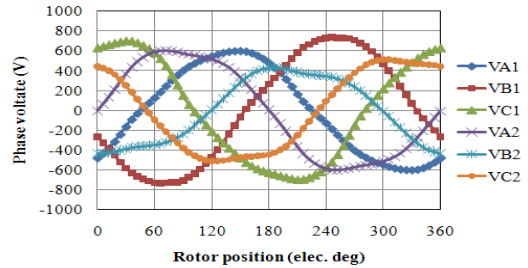
그림 11 TSC에서의 유기전압 특성  
Fig. 11 Induced voltage under TSC ( $I_{d1}=I_{d2}=0, I_{q1}=I_{q2}=I_{peak}$ )

작시킬 경우 전기장하는 모두 같은 상황이 되기 때문이다. 따라서 상 유기전압의 파형이 서로 일치하게 됨을 그림 11(c)를 통해 알 수 있다.

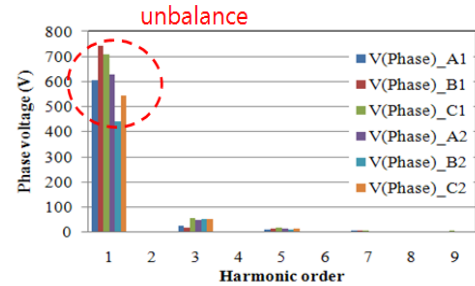
한편, 무정지 기능을 만족시키기 위해서는 OSC상황에서도 상평형을 이루는 유기전압 특성을 보여줘야 한다. OSC에서 모델에 따른 상 유기전압 특성을 그림 12에 제시하였다. 그림에서 알 수 있듯이, 고정자의 모듈러 세그먼트



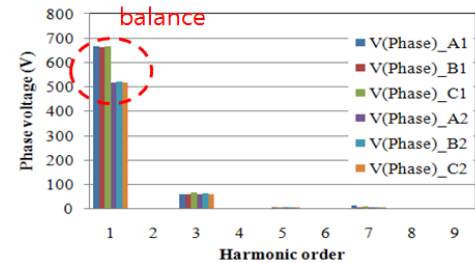
(a) 자속밀도 분포



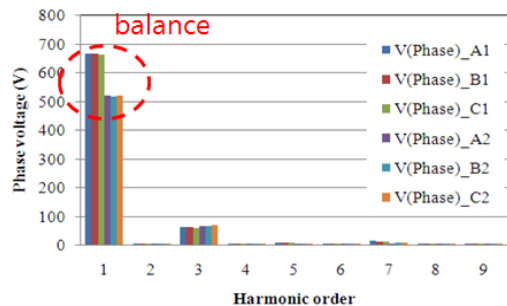
(b) 유기전압 파형, MD



(c) 유기전압 파형, MD



(d) 유기전압, MDE-A1



(e) 유기전압, MDE-B1

그림 12 OSC에서의 유기전압 특성  
Fig. 12 Induced voltage under OSC ( $I_{d1}=0, I_{q1}=I_{peak}, I_{d2}=I_{q2}=0$ )

단위가 가장 큰 MD의 경우, 자계포화특성이 존재함을 그림 12(a)을 통해 알 수 있다. 이는 세그먼트 단위가 클수록 세그먼트 양 끝단에서 감당해야할 자속량이 증가하여 주 자로 (Magnetic Path)에 해당되는 고정자 요크와 회전자 요크에 국부 자계포화가 발생하는 것이다.

아울러, 상 유기전압의 특성을 보면, MD는 상간 서로 값이 일치하지 않는 전압 파형을 보여주지만, 제안된 모델인 MDE는 상간 전압이 전기적 평형을 이루는 결과를 제시한다.

### 5. 결 론

본 논문은 무정지 기능을 갖는 이중 3상 인버터를 시스템을 위한 모듈화 분포권 권선을 최초로 제안하였으며 유한요소법을 이용하여 제안된 모델의 타당성을 확인하였다.

매극매상슬롯수  $q=1$ 을 채택하여 슬롯수를 최소화 하였고 MMF함수에 기초하여 본 연구에서 제안한 간략화 된 쇄교 자속법으로 모듈화 고정자구조에서도 상평형을 유지할 수 있는 체결법을 제시하였다. 제안된 모델의 검증에 위해 유한 요소법을 이용하여 인덕턴스 및 유기전압 파형을 검토하였다. 해석결과, 상인덕턴스 및 유기전압 파형으로 제시된 모델의 타당성을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 제안한 방식은 일반 대형전동기에서 널리 사용되는 분포권 방식이므로 별도의 고정자 코어의 형상변환 없이 권선 체결방식만 변환해주면 구현이 가능하다.

또한, 제안된 모델은 세그먼트 단위로 고정자 강판 및 권선을 미리 제작하여 후에 쉽게 조립될 수 있어 대형 전동기의 제작성 측면에서 크게 도움이 될 것으로 판단된다.

정상동작 시, 발전기는 두 개의 인버터로 3상 동작을 하고, 고장 시에도 한 개의 인버터만으로도 전압의 3상평형을 유지하면서 구동이 될 수 있어서 안정적인 구동이 높게 요구되는 대형 풍력발전기, 배, 항공 및 엘리베이터 응용분야에도 적용가능하리라 판단한다.

### 감사의 글

이 논문은 2012학년도 경북대학교 신입교수 정착연구비에 의하여 연구되었음.

### References

[1] Emil Levi, "Multiphase electric machines for variable-speed applications," IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 55, No. 5, pp. 1893-1909, 2008.

[2] M. Barcaro, N. Bianchi, and F. Magnussen, "Configurations of fractional-slot IPM Motors with dual three-phase winding," in IEEE International Electric Machines and Drives Conference, pp. 936-942, 2009.

[3] M. Barcaro, N. Bianchi, and F. Magnussen, "Analysis and tests of a dual three-phase 12-slot 10-pole permanent magnet motor," in IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, pp. 3587-3594, 2009.

[4] C. Jie, W. Jiabin, K. Atallah, and D. Howe, "Performance Comparison and Winding Fault Detection of Duplex 2-Phase and 3-Phase Fault-Tolerant Permanent Magnet Brushless Machines," in IEEE Industry Applications Conference, pp. 566-572, 2007.

[5] N. Bianchi and M. Dai Pre "Use of the star of slots in designing fractional-slot single-layer synchronous motors," IEE Proc. - Electr. Power Appl., vol. 153, No. 3, pp. 459-466, 2006.

[6] N. Bianchi, S. Bolognani, M. Dai Pre, and G. Grezzani "Design considerations for fractional-slot winding configurations of synchronous machines," IEEE Trans. Industry Appl., vol. 42, No. 4, pp. 997-1006, 2006.

[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] 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.

[10] 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.

### 저 자 소 개



### 서 장 호 (徐章皓)

1978년 4월 11일생. 2003년 중앙대학교 전자전기공학부 졸업. 2010년 서울대학교 대학원 졸업(박사). 2010년3월~2010년7월 서울대학교 BK21 연구원. 2010년7월~2012년6월 The University of Sheffield Research Associate. 2012년 9월~현재 경북대학교 자동차 공학부 조교수.