

## 유도기 방식 플라이휠 저장장치 모델링에 관한 연구

**최정환\***, 최호석, 손정섭, 김재언  
충북대학교

### Modeling of Flywheel Energy Storage System Using Induction Machine

Jung-Hwan Choi, Ho-Seok Choi, Jung-sup Son, Jae-Eon Kim  
Chungbuk Nationersity

**Abstract** - 본 논문은 250[kVA]의 용량을 갖는 Induction machine을 이용하여 FESS(Flywheel Energy Storage System)를 PSCAD/EMTDC를 통하여 전동모드(Motoring mode)와 발전 모드(Generating mode)에 관하여 시뮬레이션 한 논문이다.

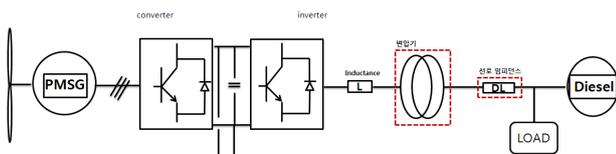
#### 1. 서 론

플라이휠 에너지 저장 장치는 축전지 등의 화학적인 저장방식 대신 플라이휠의 관성을 이용 회전, 운동 에너지로 변환하여 저장하고 필요시 전기에너지로 순시에 출력하는 기계적 에너지 저장 방식의 에너지 저장 장치로서 주로 남거나 소실되는 전기 에너지를 기계적 회전 운동 에너지로 바꿔 저장한 뒤 필요할 때 원래의 전기에너지로 재생해 꺼내 쓰는 장치이다. [1]

풍력-디젤 하이브리드 시스템에서 풍속의 변동으로 인해 발전은 변동하는 데 비해 부하 수요는 일정하여 공급부족의 현상이 나타난다. 최근에는 [그림 1]과 같이 풍력-디젤 하이브리드 시스템에 플라이휠을 연계 시킴으로써 디젤 발전기의 출력을 최소화하고 이러한 현상을 해결할 수 있다. 풍력 발전과 연계되는 에너지 저장 시스템에는 높은 효율성과 낮은 유지 비용의 기계적 장치인 플라이휠이 유리하고 계통 주파수 및 전압의 조정, 제어효과를 얻을 수 있다.

구동용 기기로 다양한 전동기의 형태가 적용되고 있으나 특히 영구 자석형 동기기와 유도기를 많이 사용하고 있다. 영구 자석형 동기기는 회전 속도가 높은 고속 플라이휠에 많이 사용되며 발전기로 운전시 유도기에 비해 제어가 더 간단하며 효율이 더 높다는 장점이 있다. 이에 비하여 유도기는 초기 여자확립 등 제어가 조금 더 어려우며 효율이 떨어진다는 단점이 있으나 설치 비용이 저렴하다는 장점이 있다. [2] [3]

따라서 본 논문에는 유도기를 이용하여 플라이휠의 에너지를 저장 및 재생하는 시스템 제어 기법을 PSCAD/EMTDC를 기반으로 시뮬레이션 한 내용을 제시하고자 한다.



〈그림 1〉 플라이휠이 연계된 풍력-디젤 하이브리드 시스템

#### 2. 본 론

##### 2.1 FESS

에너지 저장 시에는 전기적인 에너지로 플라이휠 내부에 존재하는 기기를 전동기 모드로 동작시켜 전기 에너지를 플라이휠의 회전 관성모멘트를 통한 기계에너지로 저장하고, 나중에 전원이거나 전력품질의 이상이 발생하면 플라이휠에 저장되어 있던 기계적인 에너지를 다시 전기에너지로 변환 시키고 부하에 공급할 수 있는 에너지 변환 장치이다. 높은 효율과 반영구적인 수명을 가지고 있으며 친환경적인 시스템으로서 최근 이 분야의 연구가 활발히 진행 되고 있다.

식(1)과 같이 플라이휠은 각속도와 관성에 의해 운동 에너지를 축적하게 되고, 이 운동 에너지를 전기적인 에너지로 변환하기 위해서 커패시

터가 사용된다. 식(2)와 같이 이 에너지는 커패시터에 저장된다.

본 논문에서는 풍력-디젤 하이브리드 발전 시스템에 연계할 것을 착안하여 행하였다. 풍력발전의 출력과 부하의 변동에 의한 주파수 변화를 보상하기 위해 주파수 가변 3상 전원으로 대체하고, 관성정수가 큰 플라이휠 저장장치를 설계함으로써 플라이휠의 저장 및 재생여부를 검증하도록 한다. PSCAD/EMTDC에서 제공하는 유도기의 경우 이러한 모델을 지원하지 않으므로 유도기의 특성을 이용하여 설계한다. 농형유도기의 경우 토크 제어 모드와 속도제어 모드 두가지 타입으로 동작이 가능하다. 대개 속도 제어모드로 동작한 후 과도 상태에 이르렀을 때 토크모드로 전환하지만 본 논문에서는 토크 제어모드로 동작하여 부하 토크를 "0"으로 하여 실제 관성체와 동일하게 setting하는 모델링 방법을 제안한다.

$$\text{Kinetic Energy} = \frac{1}{2} J \omega^2 \tag{1}$$

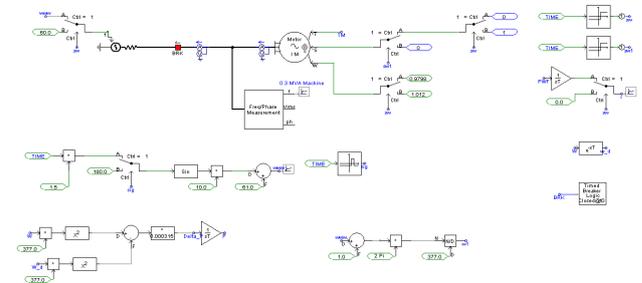
$$\text{Capacitor Energy} = \frac{1}{2} c v^2 \tag{2}$$

##### 2.2. Induction machine modeling

유도기를 이용하여 FESS를 구성하였으며 용량은 250[kVA]이다. 각각의 정격 주파수와 정격전압 (RMS)은 60[Hz]와 220[kV]로 설정하였으며 계통에 인가된 주파수의 변동을 감지하여 기기의 전동모드와 발전 모드를 구현하게 되고 전동모드 시에는 계통전원으로부터 전기 에너지가 유입되어 플라이휠에 기계 에너지 형태로 저장되며 발전 모드 시에는 역으로 플라이휠에 저장된 기계에너지가 전력 변환기를 통해 전기 에너지의 형태로 계통으로 주입된다.

[그림 2]는 유도기 모델이며, PSCAD/EMTDC에서 제공하는 모델을 사용하였으며 speed mode(1)와 torque mode(0)로 기기를 운전 할 수 있다. 유도기에 입력 속도를 slip speed로 정해 줌으로써 발전 모드와 전동 모드를 구현할 수 있는데 유도기의 동작 특성에 의하여 초기 속도를 1[p.u]보다 작게 하면 전동모드로 동작하고 1[p.u]보다 크게 하면 발전모드로 동작하게 된다. FESS로 동작하기 위해서는 전동모드에서 발전모드로의 전환이 필요하므로 전동모드 일 때에는 torque mode로 동작하여 전기 에너지를 회전체의 관성에 의해 운동에너지로 저장하고 그때의 저장된 운동에너지를 식(3)과 같이 각속도로 변환하여 발전모드로 전환하는 방법으로 모델링하였다.

< 표 1>은 Induction machine parameter 이다.



〈그림 2〉 유도기 모델링

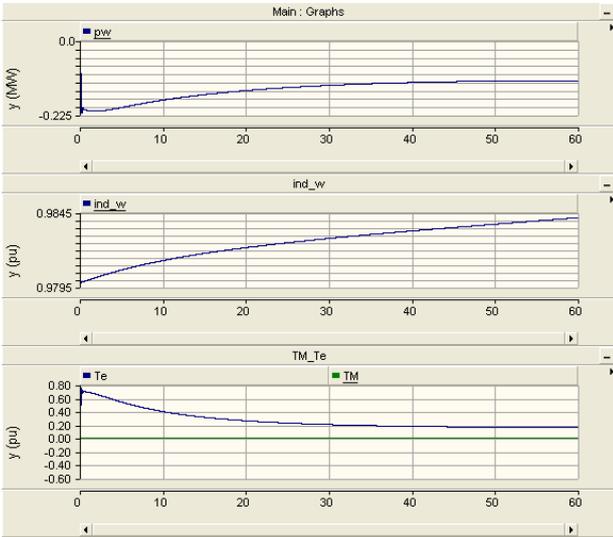
$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{\frac{1}{2} J (\omega_2^2 - \omega_1^2)}{\Delta t} \tag{3}$$

**<표 1> Induction machine parameter**

구분	파라미터	설정값
configuration	Data Generation/Entry	Explicit
	Rated RMS Phase Voltage	0.22[kV]
	Rated RMS Phase Current	0.3738[kA]
	Base Angular Frequency	376.99[rad/s]
Explicit Format Data	Stator Resistance	0.066[p.u]
	First Cage Resistance	0.298[p.u]
	Second Cage Resistance	0.018[p.u]
	Polar moment of inertia(J=2H)	3600[s]
	Mechanical Damping	0.008[p.u]

**2.3. 전동모드 (Motoring mode)**

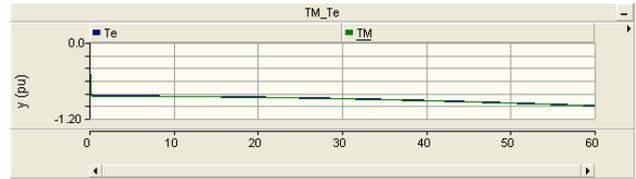
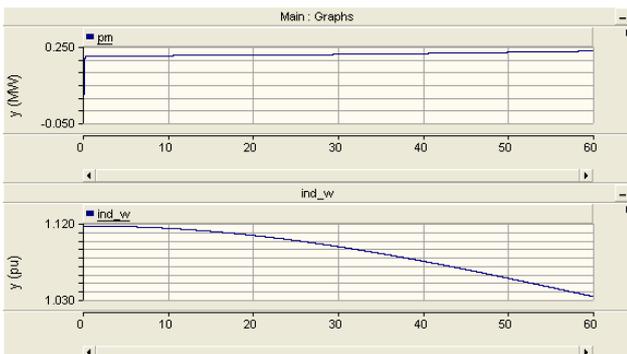
[그림 3]는 유도기의 전동모드에서의 유효전력, 각 주파, 토크 파형을 보여준다. 전동모드에서는 PWM 컨버터에서 출력된 직류 전압으로 PWM인버터에서 교류 전압의 주파수와 크기를 제어함으로써 유도기를 구동 시킨다. 전동모드에서의 유도기를 토크모드로 전환하여 계통의 주파수의 변화에 의해 입력되는 전기적인 토크에 의해 출력과 각 주파수의 변화를 볼 수 있다. 주파수의 변화에 의해 회전체에 에너지가 변화하게 되며 입력되는 전력은 관성에 의해 운동에너지로 변환하여 저장하게 된다.



**<그림 3> 전동 모드시 유효전력, 각주파수, 토크**

**2.4 발전모드(Generating mode)**

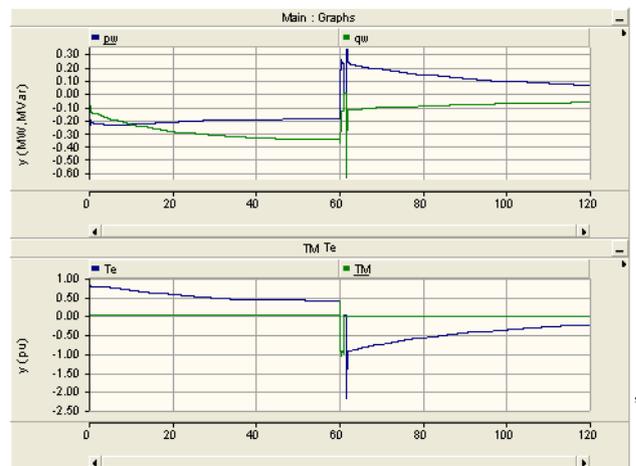
계통에서 Sag/Swell 발생 또는 정전 시 플라이휠에 축적된 에너지를 유도 전동기가 발전기로 동작 하면서 PWM인버터/컨버터가 PWM컨버터로 작용하여 직류 링크 커패시터 전압을 일정하게 제어함으로써 PWM컨버터/인버터에 직류 전원을 공급한다. [그림 4]는 유도발전기의 전력, 각 주파수, 토크 파형을 보여준다. 전동모드에서 저장된 에너지의 양을 식(3)과 같이 환산하여 각 주파수로 변환하게 된다. 유도기에 저장되어 있던 에너지는 관성에 의해 발전모드로 전환을 하게 되며 이때에 계통의 주파수의 변화에 따라 출력량을 조절한다.



**<그림 4> 발전 모드시 유효전력, 각주파수, 토크**

**3. 시뮬레이션 및 고찰**

[그림 5]는 60초간 전동 모드로 동작을 한 후 저장된 에너지를 전환하여 발전모드로 동작하는 출력과 토크의 파형을 보여준다. 최초에 토크 모드(전동모드)로 60초간 동작을 하며 저장된 에너지 량을 수식에 의해 각속도로 계산하여 순시적으로 속도 모드로 유도기를 전환시킨다. 다시 발전 모드로 동작 하기위해 토크 제어 모드로 전환하여 유도기 내에 저장되어 있는 관성에 의해 전력을 출력한다. 관성을 크기에 의해 속응 특성과 기기의 각 주파수를 조절할 수 있다. 토크 곡선에서 순시적인 속도 제어 모드로의 변화로 인한 토크의 surge가 나타난다.



**<그림 5> 전동 모드에서 발전 모드로 변환시 유효전력, 토크**

**4. 결 론**

본 논문은 PSCAD/EMTDC를 사용하여 유도기방식을 이용한 플라이휠 에너지 저장 및 재생 시스템 기법을 제시하였다. 유도기를 전동모드와 발전모드에 대한 설계 예시를 보였고 이를 혼합하여 전동모드에서의 저장된 에너지를 전기에너지로 전환하여 발전모드로 동작하는 것을 확인 하였다.

제안한 플라이휠과 풍력-디젤 하이브리드 시스템에 연계하기 위해 추가적인 제어기법이 필요할 것으로 여겨지며 현재 진행 중에 있다.

**[참 고 문 헌]**

[1] Zhang jiancheng, Huang Lipei, cHen Zhiye, "Research on flywheel energy storage system for power quality", PowerCon Proc, 2002, pp496-499  
 [2] R.G Lawrence K. L. Craven, and G.D. Nichols, " Flywheel UPS", IEEE Industry Applications Magazine, May/June, pp, 44-50, 2003  
 [3] H.Darrelmann, "Compararison of High Power Short Time Flywheel Storage Systems", Proceedings of the IEEE INTELEC '99, pp.30-32, 1999  
 [4] 김상훈 "DC, AC , BLDC 모터 제어", 2010