

동기 방식 플라이휠 저장장치 모델링에 관한 연구

최호석, 최정환, 황중철, 김재언
충북대학교

On the Modeling of a Fly wheel Energy Storage System with Synchronous Machine

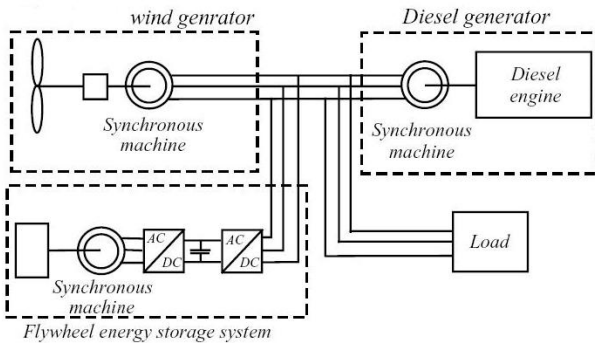
Ho-Seok Choi, Jung-Hwan Choi, Jong-Cheol Hwang, Jae-Eon Kim
Chungbuk National University

Abstract - 본 논문은 Synchronous Machine을 기반으로 하여 250[kVA]의 용량을 가지는 플라이휠을 모델링하고 그 예를 수학적으로 해석함으로써 분산전원으로서의 신재생에너지와 연계하여 에너지를 저장/출력할 수 있는 타당성을 검토할 수 있도록 한다.

1. 서 론

현재 에너지 저장장치 시스템에 대한 관심이 높아지고 연구 및 개발이 활발히 이루어지고 있는 과정에서 특히 효율성, 내구성, 친환경적 측면에서 우수한 플라이휠 에너지 저장장치 시스템(FESS: Fly-wheel Energy Storage System)에 대한 연구개발이 가속화되고 있다.

플라이휠을 이용한 에너지 저장장치 시스템의 주된 적용 분야로서는 고립지역에 풍력발전기가 디젤발전기에 결합(<그림1>)될 때, 연료 소비를 줄이고 디젤 엔진의 수명을 증가를 가능하게 하는 경우와 풍속변동에 의한 계통의 전압 및 주파수 변동을 줄여줌으로써 전력품질을 보장하는 경우로 분류된다[1].



<그림 1> 플라이휠이 연계된 디젤-풍력 발전 시스템

일반적으로 FESS는 전력변환장치와 함께 전력계통에 연결되는데 FESS측의 컨버터는 DC link 전압을 일정하게 유지할 수 있도록 제어하고, 계통 측 컨버터는 계통의 전압 및 주파수를 제어하도록 설계된다 [1][2]. 즉, 갑작스런 부하의 변동 혹은 풍력발전기의 발전량 변동에 의한 계통의 전력품질 보상 제어는 계통 측 컨버터에서 이루어지고, FESS측 컨버터에서는 DC전압을 유지하면서 Fly-wheel에서 에너지 저장 및 발전을 할 수 있도록 제어한다.

이러한 시스템의 구성과 제어 기법을 구현할 수 있도록 하기 위해서 본 논문에서는 동기 방식의 플라이휠을 EMTDC/PSCAD S/W를 통하여 모델링하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 본 론

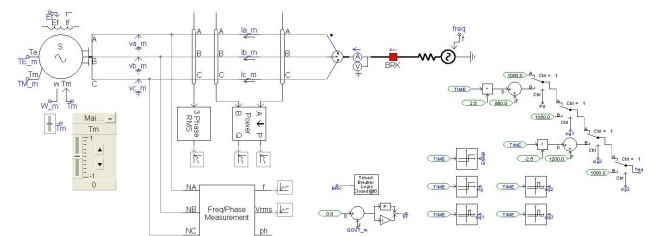
FESS의 Modeling은 풍력-디젤 하이브리드 발전 시스템에서 디젤발전기의 발전량을 최소화하며 출력이 가변하는 풍력발전량에 따른 계통의 전압, 주파수 변동을 완화할 수 있는 제어전략 마련이 우선적으로 수행되어야 한다.

본 논문에서는 가변 출력하는 풍력발전 및 부하의 변동에 의한 계통 주파수의 변동을 보상하기 위하여 필요한 전력변환장치를 주파수 가변 3상 AC전원으로 대체하고, 비교적 큰 관성상수와 일정계자 방식의 플라이휠 저장장치를 시뮬레이션 함으로써 전력의 저장 및 발전을 검증하도록 한다. 특히 실제의 FESS는 AC Machine과 축으로 연결된 관성체의 회전에너지 형태로 전력을 저장/발전하게 되는데, EMTDC/PSCAD

에서는 이러한 구조 구현을 지원하지 않으므로, 동기기 자체에 부하 토크를 "0"으로 하고 회전자 자체의 관성을 실제 관성체의 관성과 동일하게 setting하는 모델링하는 방법을 제안한다.

2.1 FESS 모델링

본 논문에서 제안하는 동기 방식 플라이휠은 정격용량 250[kVA], Base Angular Frequency(ω_s)는 6283.185[rad/sec]로 설정하였다.



<그림 2> 플라이휠 모델

위에서 보여준 <그림2>는 모델링한 플라이휠의 회로도도 인가주파수 변화를 위한 제어회로와 무효전력을 "0"으로 제어하기 위한 간단한 PI제어기를 포함하고 있다.

FESS model에 인가하는 AC전원은 가변 주파수 방식으로 주파수의 변화는 외부 제어기를 통해 생성한 주파수를 시간에 따라 변화시켜 인가할 수 있도록 모델링하였고, 일정계자 방식의 동기기는 계자전압 E_f 입력에 real constant값을 인가할 수 있도록 설계하여 구현하였다. 모델링한 동기기의 관성을 FESS의 실제 관성체와 관성을 동일하게 setting하기 위해서 토크로 표현되는 동기기의 Swing Equation(식(1))에서 T_m 값을 "0"으로 입력해 줌으로써 rotor의 관성에 의해서만 회전을 할 수 있는 형태로 모델링 하였다.

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (1)$$

J : moment of inertia [kg·m²]
 θ_m : angular displacement of rotor [rad]
 T_a : accelerating torque [N·m]
 T_m : mechanical torque [N·m]
 T_e : electrical torque [N·m]

동기기의 Parameter중 하나인 관성상수(Inertia Constant, H)값(식(2))에 의해 관성모멘트(Moment of Inertia, J)를 설정하였고, 이에 관한 자세한 내용은 시뮬레이션 결과와 더불어 기술하도록 한다.

$$H = \frac{\text{stored kinetic energy at synchronous speed}}{\text{machine rating}} \quad (2)$$

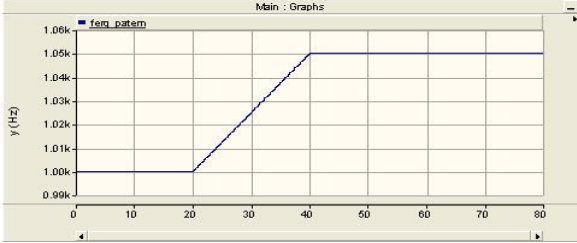
$$= \frac{\frac{1}{2} J \omega^2}{S_{3\phi}}$$

본 논문에 적용된 FESS에서의 에너지 흐름은 인가전원의 주파수 변동에 따라서 전동모드(Motoring)와 발전모드(Generating)의 두 가지 형태로 나뉘는데 시뮬레이션 결과는 이 두 가지 모드를 기준으로 분석해 보았다.

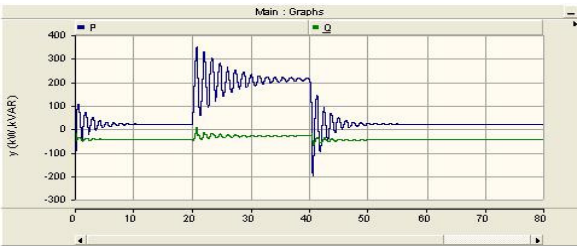
2.2 시뮬레이션 분석

2.2.1 전동모드

전동모드에서는 인가전원 주파수를 동기기의 동기속도인 6283.185[rad/s]로 20초간 운전을 유지하다가 20~40초 사이에 314.16[rad/s](=50[Hz])를 증가시켜 운전을 시키며 에너지 흐름을 확인하였다(<그림3,4>).



<그림 3> 전원 주파수 패턴



<그림 4> 전력 파형

전력파형을 해석해 보면 전원주파수의 변화가 없을 시에는 에너지 변화가 거의 없다가 주파수 변화구간에서 약 200[kW]의 전력을 흡수하고 있는 것을 알 수 있다. 이는 아래의 식(3)을 만족하고 있으며,

$$\Delta P \propto \frac{\Delta \omega}{\Delta t} \quad (3)$$

주파수 변동구간에서 동기기로 유입되는 에너지는 아래의 식(4)에 의해 계산될 수 있는데,

$$\Delta E = \frac{1}{2} J \frac{(w_2^2 - w_1^2)}{\Delta t} \quad (4)$$

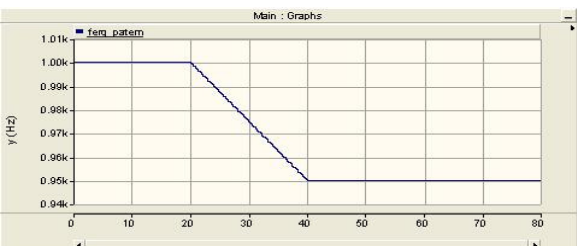
3.84[MJ]의 값을 갖는다($J=1.9[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$ 으로 적용하였는데, 이는 뒷 절에서 설명하도록 한다). 에너지 단위인 [MJ]로 표현된 이 값을 전력단위인 [kW]로 환산하여 보면,

$$\frac{3.84[\text{MJ}]}{3.6[\text{MJ}]} \frac{1[\text{kWh}]}{1[\text{h}]} \frac{3600[\text{s}]}{20[\text{s}]} = 192[\text{kW}] \quad (5)$$

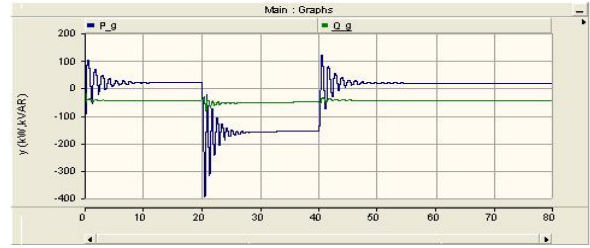
로 계산되고, 위 출력파형의 값은 이론상의 수치와 약 4[%] 차이를 보이며 거의 동일함을 알 수 있다.

2.2.2 발전모드

발전모드에서는 전동모드와 반대로 동기속도로부터 20초간 인가전원 주파수를 50[Hz] 줄여주면서 에너지 흐름을 확인하였을 때, 기기에서 전원 쪽으로 175[kW]를 발전하고 있다.



<그림 5> 전원 주파수 패턴



<그림 6> 전력 파형

전동모드와 동일하게 에너지의 양을 계산해 보면 3.66[MJ]을 20초간 출력하고 있으며, 전력단위로 환산하면 182.85[kW]를 이론상 출력한다. 실제로 시뮬레이션 한 결과 값인 약 175[kW]는 이론값과 3.85[%]의 차이를 보인다.

전동모드와 발전모드 사이에 이론적 해석상에서 에너지 양의 차이를 보이는 이유는 인가전원 주파수 레벨의 차이(전동모드: 1000→1050[Hz], 발전모드: 1000→950[Hz])에서 발생하게 되는 것으로 해석된다.

2.3 고찰

FESS를 모델링함에 있어서는 무엇보다 관성모멘트(Moment of Inertia, J) 요소가 중요하다고 할 수 있다. 관성모멘트의 크기에 따라 로터의 회전가속도가 결정되고, 회전속도의 증감에 따라 에너지의 조류 상태와 그 양이 결정되기 때문이다.

일반적인 동기기의 경우에는 2~4[Ws/VA]의 값을 가지고, 저속터빈의 경우에 크기는 9의 값을 갖는 경우도 있다[4]. 그러나 이 수치는 J값과는 개념상 차이가 있다. 이 값을 식(2)에서 표현된 관성상수라 하는데 단위에서 알 수 있듯이 식(4)의 에너지와 기기의 정격용량의 비로 표현된다.

본 논문에서 적용한 동기기의 관성상수 H는 150[Ws/VA]으로 설정하였다. 정격용량 250[kVA], 동기속도 6283.185[rad/s]로 설계한 기기에 적용하여 수용 가능한 총 에너지를 식(2)로부터 산출하면,

$$\text{Energy} ; E = \frac{1}{2} J \omega^2 = 250 \times 10^3 \times 150 = 37.5[\text{MJ}] \quad (6)$$

이고 식(6)으로부터

$$J = 37.5 \times 10^6 \times 2 \div 6283.185^2 = 1.9[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$$

의 값을 가지는 플라이휠을 설계한 것이다.

앞 절(FESS의 모드)의 시뮬레이션 결과와 J값을 적용하여 이론상 해석한 결과의 차이가 없음을 확인함으로써 제안한 FESS 모델이 타당하다고 평가할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 EMTDC/PSCAD를 이용하여 플라이휠 모델을 제안하고 그 성능을 확인하였다.

제안한 플라이휠 모델과 양방향 전력조류가 가능한 Back to Back 방식의 전력변환장치를 추가적으로 모델링/조합하여 풍력-디젤 하이브리드 시스템에 연계하여 풍력발전의 출력변화와 부하변동 등에 따른 계통 주파수의 안정화 방안, 전압변동 절감 등의 제어가 가능하도록 실험 및 연구가 추가적으로 필요할 것으로 여겨지며 현재 진행 중에 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] Gabriel CIMUCA, "Comparative study of flywheel energy storage systems associated to wind generators".
- [2] A. M. O. Haruni, "Dynamic Operation and Control of a Hybrid Wind-Diesel Stand Alone Power Systems", 2010.
- [3] H. Hofmann 외, "Synchronous reluctance motor/alternator for flywheel energy storage systems", IEEE power electronics workshop, pp.199-206, 1996.
- [4] William D. Stevenson, Jr., "Elements of Power System Analysis", 1995.
- [5] 김상훈, "DC, AC, BLDC 모터제어", 2010.
- [6] Stephen J. Chapman, "Electric Machinery Fundamentals", 1998.
- [7] J. L. da Silva Neto, "Control of a power circuit interface of a Flywheel based Energy Storage System", 2003.