

플라이휠 에너지저장 장치를 이용한 전력보상

Power Compensation by Flywheel Energy Storage System

김윤호* 이경훈** 박경수**
Kim, Yoon-Ho Lee, Kyoung-Hun Park, Kyoung-Soo

ABSTRACT

The flywheel generator in use as a power source for experimental device can be large enough to generate the electric power to make it suitable for application in wide range of industries. The proposed system produces the good performance for power control. In this paper, the validity of the flywheel for power storage is described and the new control method which applies the space vector control scheme are proposed. This system is superior to conventional power compensator in the aspect of stability improvement and it is possible to make the converter capacity small. Continuous operation by flywheel can be realized even during power network faults such as 1-line ground.

1. 서론

근래 들어서 전력계통의 규모확대, 장거리 송전선의 증가에 따라서 송변전설비에 있어서 계통의 보다 동적인 안정도 향상대책들이 요구되어 왔다. 특히 고전압 장거리 송전선에 대해서는 그 저손실화를 위한 댐핑계수가 저하하고 부하 등의 과도 변동에 따른 유효전력진동의 응답이 느리게 되는 현상이 나타나고 있다. 따라서 종래의 중간조상설비에 의한 전압, 제어만으로는 정밀한 제어가 곤란하게 되었고, 유효, 무효전력의 동시제어에 의한 안정도 향상대책이 필요하게 되었다. 이 밖에 전력공급의 고신뢰화라고 하는 관점에서 보면 계통 고장에 따른 순시정전, 순시전압저하등에 대한 대책이 필요하고, 특히 전산기, OA기기 등의 고신뢰성을 필요로 하는 시스템에 대한 무정전화는 금후 필수조건이 된다. 이 논문에서는 이처럼 고장전력발생시 이를 보상하기 위한 시스템으로서 회전기 및 플라이휠에 의하여 만들어지는 에너지 저장효과를 이용하고 전압PWM 방식을 사용하여 회전기의 2차측에 가해지는 전류를 순시적으로 고속제어가 가능하도록 제어하는 전력조상시스템을 설계하고 있다. 그리고 이를 위한 한 방법으로 최근에 가변속 발전기 시스템을 이용한 전력 제어 기법을 사용한다.^[3~4] 이는 교류 여자 전동기인 동기기나 유도기가 전동기/발전기의 두가지 기능을 모두 가지고 있음을 이용한다. 그리고 실제로 사용되는 하드웨어적인 시스템에는 dc-link

*중앙대학교 전기공학과 교수, 정회원

**중앙대학교 전기공학과 석사과정, 학생회원

**중앙대학교 전기공학과 석사과정, 학생회원

GTO 컨버터와 사이클로 컨버터(cycloconverter) 등을 포함한다. 이는 잘 알려진 가변속 발전기 원리를 이용한 것이다. 플라이휠을 지닌 전동기를 이용한 가변속 발전 시스템은 전력계통에 있어서 안정화를 위한 새로운 관심거리가 되고 있다. 그 이유중 하나는 플라이휠이 갖는 에너지 저장을 이용하여 고장시에 전력을 계통으로 회생시킬 수 있기 때문이다. 현재 플라이휠에 의한 에너지 저장은 초전도 코일 등에 의한 에너지 저장에 비교해서, 대용량화가 쉽고 경제적으로도 가격이 저렴하게 실현할 수 있는 이점이 있다. 더욱이, 본 시스템은 회전기의 2차여자에 의한 1차전류와 전압의 제어를 하기 때문에, 그 구성상 종래의 인버터를 이용한 정지형무효전력 보상장치나 능동필터에 비교해서, 그 변환기용량과 규모를 감소시키는 것이 가능하다는 특징이 있다. 본 논문에서는 플라이휠 시스템의 제어를 설계하고 시스템의 모의 시험을 통하여 이를 확인하였다.

2. 본 문

2.1 전력보상시스템의 구조

①가변속 시스템

가변속 플라이휠 발전기는 교류여자에 의해 가변속 운전이 가능한 발전기(권선형 전동기)와 에너지를 회전에너지로써 축적 가능한 플라이휠, 권선형 전동기를 제어하는 가변속 교류 여자기로 구성된다. 제안된 시스템에서는 기본적으로 권선형 유도전동기의 가변속 교류 여자 제어를 하고 있으므로 이를 위해 전체시스템의 구조를 살피기 전에 가변속 시스템(Variable speed system)의 기본적인 원리를 설명한다. 일반적으로 3상 결선을 띤 모터/발전기(motor/generator)인 유도기의 회전자측에 3상 전원을 인가한 경우 회전자측은 회전자에 발생하게 된다. 이때 W_1 의 주파수인 전력계통의 전원이 고정자측에 연결되었을 경우 회전자측의 주파수를 W_r 이라고 하고 이후 발생하게되는 슬립의 주파수를 W_s 이라고 하면 다음과 같은 관계가 성립하게 된다.

$$W_1 = W_r + W_s \tag{2.1}$$

여기서 슬립주파수 전원이 회전자 측에 연결된 전원이 되며 이것은 W_s 으로 회전하는 자속이다. 이 구성에서 여자전원의 주파수를 축속도의 변화에 따라서 조절하면 고정자에 나타나는 전압의 주파수는 축속도의 변화에 따르지 않고 일정하게 된다. 이것이 가변속 교류 여자기의 원리이다. 그리고 이를 설명하기 위한 기본적인 가변속 교류 여자 시스템의 구성도가 그림 1에 나타나 있다. 여기서 슬립 전원이 회전자의 3상 권선에 연결되어있으며 고정자측의 주파수를 가변속시에도 일정하게 하도록 하기 위해서는 제어알고리즘을 작성시 할 때 위의 공식(2.1)을 적용시켜야 한다.

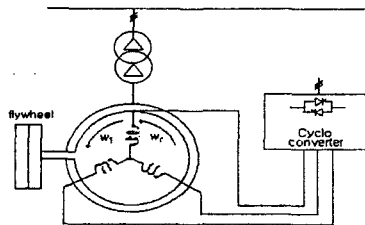


그림1. 교류 가변속 시스템

② 제안된 전력보상 시스템의 구조

그림2는 이 논문에서 제안하는 전력보상을 위한 시스템의 기본구조를 보여준다. 여기에서 유도기는 정류기와 DC 커패시터, 초퍼 그리고 PWM인버터와 여자 변압기 등으로 구성된 DC link 컨버터에 의하여 여자되는 것을 알 수 있다. 실제응용에 있어서는 DC link 컨버터는 계통의 용량이 매우 크므로 이를 건너기 위하여 인버터와 커패시터의 구조는 병렬로 여러개를 연결해서 쓰는 Cascade 형식을 사용하여야 한다. 그러나 본 논문에서는 모의의 대상을 간단히 하기 위해서 병렬구조를 쓰지 않았다. 정류기는 1차측에 고장전력이 발생하였을 때 이를 전원으로 하여 회전자측 인버터에 전압을 가할 때 고른 전압을 가할수 있도록 일정 전압을 유지시키는 역할을 한다. 그리고 초퍼는 계통에 고장전력발생시 유도기의 2차측 권선에 과전압 발생을 억제 시키기 위하여 DC link단에 연결하였다. 그래서 최종적으로 DC link단의 마지막에 연결되어 있는 커패시터에는 고장전력 발생시 유도기의 2차측에 필요한

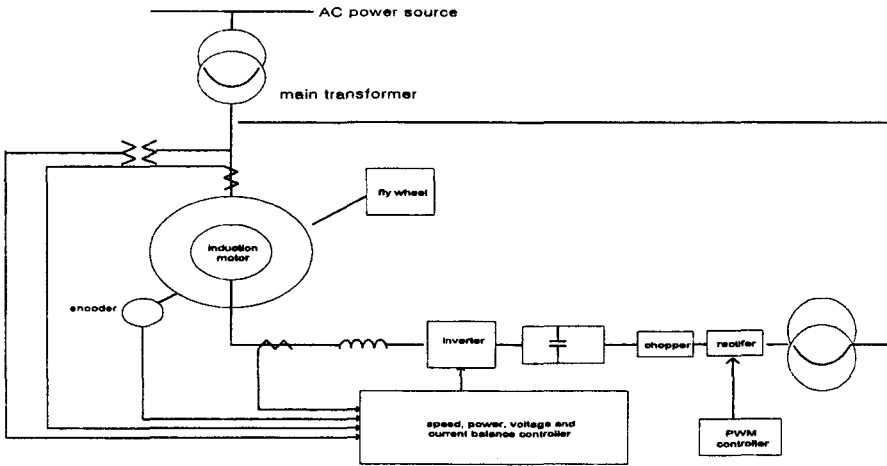


그림2. 제안된 시스템의 구조

전압을 인가할 수 있는 DC 전압이 충전되게 된다. 그리고 스위칭 소자로는 스위칭 주파수가 높은 IGBT를 사용하였으며 이는 빠른 과도응답성능을 얻기 위하여 높은 스위칭 주파수가 요구되기 때문이다.

2.2 모의를 위한 간략화된 회로 및 제어기 설계

그림3은 위에서 제안된 시스템을 모의 하기 위하여 EMTP(Electro Magnetic Transient Program)에 맞도록 주 회로도를 간략화 한 것이며 이때 DC link단에서 인버터 전단의 정류기와 초퍼를 통과하여 DC 커패시터에 충전된 전압이 일정하다는 가정 하에 인버터와 연결된 DC link단을 생략함으로써 모의를 위한 회로도를 간략화 할 수 있다. 그리고 실제 경우와 비슷한 효과를 얻기 위하여 계통의 선간에 있을 수 있는 작은 저항과 인덕턴스 성분을 고려하였다. 여기서 유도기는 권선형 유도기를 사용하고 고정자에 연결된 3상전원은 220V, 60Hz로 하였다. 그리고 인버터의 구동방식은 SPWM(정현파 비교 방식)이며 인버터의 구동전원은 DC커패시터에 충전된 전압에 해당하는 DC전원을 바로 사용하였다.

① 유도기의 좌표 변환이론

위의 제어블록 다이어그램에서 제어를 위한 입력변수와 오차상수는 모두 공간벡터 개념을

이용한 것이다. 이는 상변환(3상-2상)을 한후에 이를 좌표 변환(동기-정지)하여 사용한다. 이런 방식은 유도기체의 고전적 방법으로서 교류 신호의 제어를 직류 신호의 제어처럼 할수 있는 장점이 있으므로 교류 전동기제어 방식으로 널리 사용된다. 상변환과 좌표변환을 위한 수식과 그림은 아래와 같다.

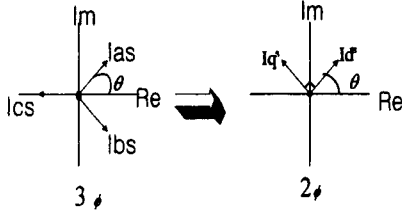


그림3. 상변환

$$\begin{aligned} I_d^s &= 2/3 (I_{as} - 1/2 I_{bs} - 1/2 I_{cs}) \\ I_q^s &= 2/3 (\sqrt{3}/2 I_{bs} - \sqrt{3}/2 I_{cs}) \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} I_{as} &= I_d^s \\ I_{bs} &= \sqrt{3}/2 I_d^s - 1/2 I_q^s \\ I_{cs} &= -\sqrt{3}/2 I_d^s - 1/2 I_q^s \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} I_d^e &= \cos \theta * I_d^s + \sin \theta * I_q^s \\ I_q^e &= -\sin \theta * I_d^s + \cos \theta * I_q^s \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} I_d^s &= \cos \theta * I_d^e - \sin \theta * I_q^e \\ I_q^s &= \sin \theta * I_d^e + \cos \theta * I_q^e \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} \text{유효전력} &= 3/2 (I_d^s * V_d^s + I_q^s * V_q^s) \\ \text{무효전력} &= 3/2 (V_d^s * I_q^s - I_d^s * V_q^s) \end{aligned} \quad (3.5)$$

여기서 I_{as}, I_{bs}, I_{cs} 는 3상 전류이며 I_d^s, I_q^s 는 3상을 2상으로 상전환 했을때의 정지좌표계에서의 d,q축 전류이다. I_d^e, I_q^e 는 동기좌표계의 d,q축 전류이다.

② 제안된 시스템의 제어

그림4는 모의를 위하여 간략화시킨 회로도이다. 전체 블록은 크게 1차측의 전압과 유효전력 두가지를 제어하기 위한 것이다. 여기서 전력을 제어할 경우에는 하단의 전압제어 루프를 정지(locked)하며 반대로 전압제어를 할 경우에는 위의 전력제어 루프를 정지(locked)시켜야 한다. 전체 제어루프는 크게 가변속 발전 시스템(adjustable speed generation system)

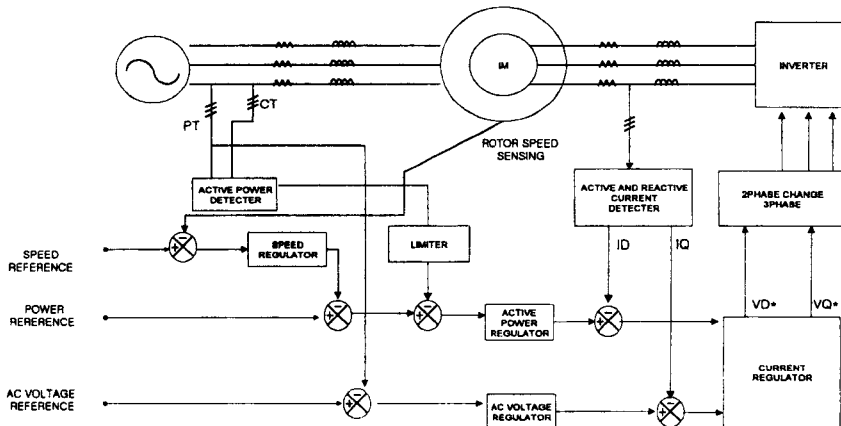


그림 4 모의를 위한 회로도 및 제어블록 다이어그램

Fig4 Simplified simulation model and control block diagram

의 전압과 전력을 제어하기 위한 주 루프(major loop)와 회전자측의 유효,무효전류를 측정하기 위한 종속 루프(minor loop)로 구성되어 있다. 그리고 유효전력을 선별적으로 제어하기 위하여 속도 제어 루프는 유효 전력 제어기의 앞단에 설치하였다. 먼저 계통에 연결된 어떤 임의의 부하에 의하여 1차측 즉 전력계통에 고장전력이 발생하였을 경우 이때 1차측에 연결된 PT와 CT를 통하여 고장전압이나 고장전류가 측정되며 이를 유효전력 측정기(active power detector)를 통해서 계산한다. 그리고 유도기의 회전자측에 연결된 속도측정기(encoder)를 통하여 속도를 센싱받아서 이를 속도지령치와 비교하게 된다. 그리고 이 속도 오차값은 속도 제어기를 통과하게 되고 이는 유효전력 지령치와 더해져서 유효전력 제어기를 거쳐 유효전류의 지령치를 발생한다. 그리고 이때 2차측 즉 회전자에 가해지는 슬립전원의 주파수와 전류를 센싱받고 이때 센싱받은 3상전류는 유효,무효 전류 측정기를 통하여 상변환을 하고 이를 통하여 계산된 유효전류는 유효전류 지령치와 비교되어 유효전압 지령치를 생성한다. 이때 유효전력을 제어하기 위해서는 앞에서 언급한대로 무효전류 제어루프는 정지 상태가 된다. 상변환과 좌표변환을 위해서는 3.1절에서 언급한 공식 (식3-1,3-2, 3-3, 3-4) 을 사용 하였으며 위의 제어 블록 다이어그램은 EMTP의 TACS(Transient Analysis of Control Systems)로 프로그래밍 하였다. [78]

2.3 모의시험 결과 및 고찰

모의시험 과도응답반응이 우수한 EMTP를 사용하였으며 모의시험에 사용된 유도전동기의 상수는 다음과 같다. 여기에 사용된 유도전동기는 EMTP 에서 UM TYPE4형식을 사용했다.

표 1 권선형 유도 전동기의 파라미터

유도 전동기의 정격: 3Phase, 220V,	
60Hz, 2Pole	
Rs = 0.095pu	Rr = 0.075pu
Ls = 0.005pu	Lr = 0.005pu
Initial speed = 182.84 rad/sec	
Inertia = 5*E+8 pu	

그림5는 유효전력보상시 과도응답을 보여주고있다. 그림5(a)는 유효전력의 기준값이다. 약 200msec에서 고장전력이 발생하였다고 가정하고 모의를 하였을때 이때 유효전력이 보상되는 것을 그림5(b)에 나타내었다. 여기서 유효전력의 과도응답 반응시 높은 서지가 유도되는 것은 플라이 휠이 갖는 높은 관성력 때문인데 이를 줄이기 위하여 유효전력을 일정량 이하로 제한하였다. 그리고 약 100msec이내에 반응을 한다는 것을 확인하였다. 그리고 유효전력이 보상되는 방향이 전원측에서 관찰할때는 방향이 반대이므로 (-)의 기준값이 가해졌음을 알수있다.그림5(c)는 과도응답시에 전동기의 2차측에 흐르는 전류이며 5(d)는 이때 보상되는 동안에 슬립주파수가 증가하는 것을 보여준다. 그림5의 (e)와 (f)는 1차측 전압과 전류 파형인데 여기서 2차측의 변화에 의하여 유도기는 발전기 모드로 변환되어 1차측에 고장전력을 보상할수 있는 전력을 공급하게 된다. 그리고 1차측의 주파수는 변동이 되지 않아서(60 Hz 유지) 안정한 전력공급이 이루어짐을 확인할수 있으며 약 200 msec에서 부터 과도적으로 전압과 전류의 크기가 증가함을 확인한다.

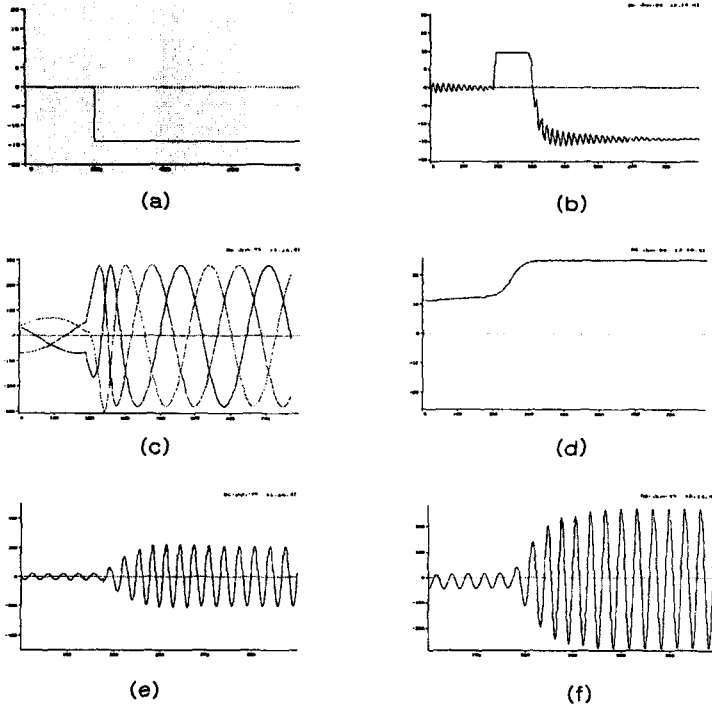


그림5. 유효전력의 보상

- (a) 유효전력의 기준값 (b)유효전력의 과도응답 (c)2차측 전류
 (d)슬립주파수의 변화 (e)고정자측의 전압 (f) 고정자측 전류

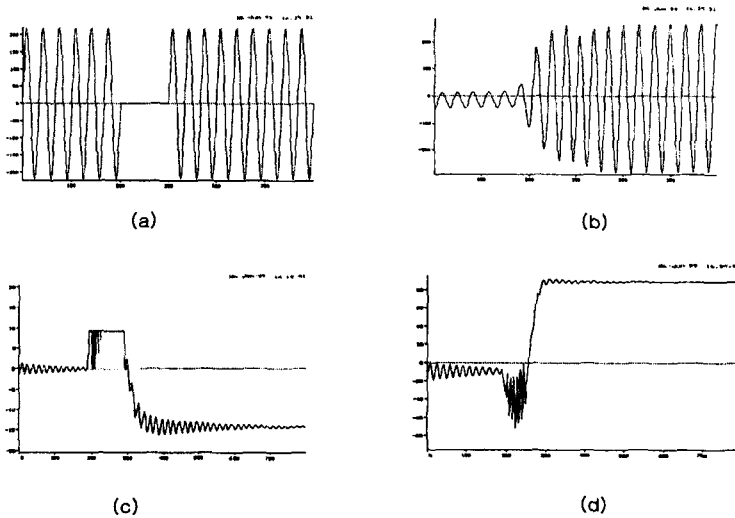


그림 6 1선지락시 전력보상

- (a)전원측의 전압 (b)1차측 전류 (c)유효전력의 과도응답
 (d) 무효전력의 과도응답

그림6은 플라이 휠이 갖는 축적 에너지를 이용하여 고장시 전력보상효과를 확인한 것이다. 이는 전동기 모드에서 플라이 휠이 에너지를 축적하여 고장시에 이를테면 1선지락과 같은 경우에 에너지를 1차측에 회생시켜 안정적인 과도응답반응을 보이는것을 의미한다. 임으로 약 200msec에서 부터 50msec 동안 1선 지락을 가정하여 이때 유효,무효전력의 보상을 관찰하였다. 그림6의 (a)는지락시 1차측에 가해지는 a상의 전원전압이며 6(b)는 이때 1차측에 흐르는 전류이다. 여기서 그림5에서의 1차측 전류에 비하여 과도반응시 진폭의 변화가 심함을 알수있다. 그리고 6(c)과(d)는 유효,무효 전력의 과도응답반응을 보여준다. 역시 그림 5에 비하여 진폭의 변화가 심함을 확인할수 있다. 그러나 거의 같은 시간내에 전력보상이 이루어 지는 것을 확인할수 있다. 따라서 고장시에도 제안된 시스템에 의하여 연속적인 전력공급이 가능함을 확인한다.

3.결론

전력계통에서 발생하는고장전력은 실제 작은 변동에도 많은 부하에 많은 영향을 미치게 된다. 최근에는 부하가 점점 다양해짐에 따라서 이를 보상하는 전력제어의 요구 성이 증대 되었다. 따라서 본 논문에서는 이를 해결하기 위하여 플라이 휠을 지니는 유도기 시스템을 이용하여 인버터제어를 통해서 빠른 응답성능을 보였다. 그리고 계통에서 발생할 수 있는 고장발생 시에도 플라이 휠이 갖는 에너지 저장기능을 이용하여 계통에 전력을 공급할 수 있는 특징과 이를 통하여 에너지 저장 및 역률개선 함께 에너지절약효과를 동시에 가져올수 있음을 확인하였다. 이는 앞으로 기존의 정지형 무효전력 보상에 비하여 용량축소와 안정도 측면의 우수성으로 인해서 더욱 발전될 것으로 보인다. 그리고 가변속 발전기 시스템은 실제 응용에 있어서는 수 MVA의 고전력에 사용되므로 앞으로는 이에 따라 높은 용량을 견디는 소자의 개발이 이루어져야 할 것으로 보인다.

참고 문헌

1. Andrezi M.trazynalowski, " The field orientation principle in control of induction motor" Kluwer Academic Publishers, chap1, pp 20-58
2. B.K.bose. " Power electronics and ac drives" Prentice Hall, 1986
3. Hirofumi Akagi, T. IEE "Control strategy and dynamic preformance of a double -fed flywheel generator-motor" Vol.118-D, No.11, 1998
4. Hirotaka chikaraishi ,Minoru arimitu, Yi wang (Tokyo institute of thchnolgy) T.IEE of japan "Fast response power stabilizer using ac - excited generator" vol.113-D, NO. 11, pp.1254-1261,1993
5. Hombu.m EPE 95, "Harmonic analysis on a slip -power recovery system fed by a DC link GTO converter" pp 3-239-3-244,1995
6. D.W.Novotny and T.A.Lipo.oxford, "Vector control ad Dynamics of AC drives." chap4-8,1996
7. 한국전력공사 기술연구팀 1991 " A study on the theory and applications of the electromagnetic transients program(EMTP) "
8. Systems control division of power automation, Inc, palo alto ,california,1989 "EMTP revised rule book version 2.0"