

플라이휠 유도전동기 시스템을 이용한 에너지 저장 및 전력보상

Energy Storage And Power Compensation Based on Flywheel WRIM System

김윤호¹, 이경훈², 박경수³

Yoon-Ho Kim, Kyoung-Hun Lee, Kyoung-Soo Park

Key Words : adjustable speed generation system(가변속 시스템), flywheel(플라이휠),
step response of active power(유효전력의 계단응답),
EMTP(전자기현상 과도응답 프로그램)

Abstract

A flywheel system which can compensate electric power is presented. The designed system has a capability of providing real and imaginary power instantaneously as well as storing energy. In this paper, a control algorithm is designed. The designed algorithm is to control the secondary side current of the wound rotor induction motor using voltage-based PWM inverter. The flywheel system has advantages in converter size and power quality improvement comparing to the conventional system.

1. 서 론

근래 들어서 전력계통의 규모확대, 장거리 송전선의 증가에 따라서 송변전 설비에 있어서 계통의 보다 동적인 안정도 향상 대책들이 요구되어 왔다. 특히 고전압 장거리 송전선에 대해서는 그 저손실화를 위한 댐핑계수가 저하하고 부하 등의 과도변동에 따른 유효전력진동의 응답이 느리게 되는 현상이 나타나고 있다. 따라서 종래의 중간 조상설비에 의한 전압제어만으로는 정밀한 제어가 곤란하게 되었고, 유효 및 무효전력의 동시제어에 의한 안정도 향상대책이 필요하게 되었다. 이밖에 전력공급의 고신뢰화라고 하는 관점에서 보면 계통고장에 따른 순시정전 및

순시전압저하 등에 대한 대책이 필요하고, 특히 전산기, OA기기 등의 고신뢰성을 필요로 하는 시스템에 대한 무정전화는 금후 필수조건이 된다[1, 2, 3]. 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 가격을 저렴하게 실현할 수 있는 이점이 있다. 더욱이, 이 시스템은 회전기의 2차역자에 의한 1차전류와 전압의 제어를 하기 때문에, 그 구성상 종래의 인버터를 이용한 정지형 무효전력 보상장치

*1 정회원, 중앙대학교 전기공학과, 교수

*2 정회원, 중앙대학교 전기공학과, 석사과정

*3 정회원, 중앙대학교 전기공학과, 박사과정

나 능동필터에 비교해서 그 변환기 용량과 규모를 감소시키는 것이 가능하다는 특징이 있다. 본 논문에서는 이처럼 고장전력 발생시 이를 보상하기 위한 시스템으로서 회전기 및 플라이휠에 의하여 만들어지는 에너지 저장효과를 이용하고 전압 PWM 방식을 사용하여 회전기의 2차측에 가해지는 전류를 순시적으로 제어하는 전력조상 시스템을 설계하고자 한다. 그리고 이를 위한 한 방법으로 가변속 발전기 시스템을 이용한 전력 제어 기법을 사용한다. 이는 교류 여자 전동기인 동기기나 유도기가 전동기/발전기의 두가지 기능을 가지고 있음을 이용하는 것이다.

2. 전력보상 시스템의 구조

2.1 가변속 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. 이 시스템에서는 기본적으로 권선형 유도전동기의 가변속 교류 여자제어를 하고 있으므로 이를 위해 전체시스템의 구조를 살펴보기 전에 가변속 시스템(Variable speed system)의 기본적인 원리를 설명한다.

일반적으로 3상 결선을 한 모터/발전기(motor/ generator)인 유도기의 회전자 측에 3상 전원을 인가한 경우 회전자계가 발생하게 된다. 이때 W_1 의 주파수인 전력계통의 전원이 고정자 측에 연결되었을 경우에, 회전자 측의 주파수를 W_r 이라고 하고, 이후 발생하게되는 슬립의 주파수를 W_s 이라고 하면, 다음과 같은 관계가 성립하게 된다.

$$W_1 = W_r + W_s \quad (2.1)$$

여기서, 슬립주파수 전원은 회전자 측에 연결된 전원이 되며, 이것은 W_s 로 회전하는 자속이

된다. 이 구성에서 여자전원의 주파수를 축속도의 변화에 따라서 조절하면 고정자에 나타나는 전압의 주파수는 축속도의 변화에 관계없이 일정하게 된다. 이것이 가변속 교류 여자기의 원리이다. 그리고 이를 설명하기 위한 기본적인 가변속 교류 여자 시스템의 구성도가 Fig. 1에 나타나 있다. 여기서 슬립전원이 회전자의 3상 권선에 연결되어 있으며 고정자 측의 주파수를 가변속시에도 일정하게 하도록 하기 위해서는 제어 알고리즘을 작성할 때 위의 식 (2.1)을 적용시켜야 한다.

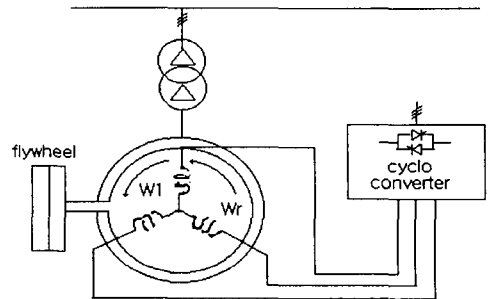


Fig. 1 Variable AC-excited system

2.2 전력보상 시스템의 구조

Fig. 2는 설계된 전력보상을 위한 시스템의 기본 구조를 보여준다. 각 블록에 대한 회로도 와 제어블록은 Fig.4에 부연 설명되어 있다. 유도기는 정류기와 DC 커패시터, 그리고 PWM인버터와 여자변압기 등으로 구성된 DC link 컨버터에 의하여 여자되는 것을 알 수 있다. 실제 응용에 있어서는 DC link 컨버터는 계통의 용량이 매우 크므로 인버터와 커패시터의 구조는 병렬로 여러 개를 연결해서 쓰는 Cascade 형식을 사용하여야 한다. 그러나, 본 논문에서는 모의의 대상을 간단히 하기 위해서 병렬구조를 사용하지 않았다. 정류기는 1차측을 전원으로 하여 회전자 측 인버터에 고른 전압을 가할 수 있도록 일정 전압을 유지시키는 역할을 한다. 최종적으로 DC

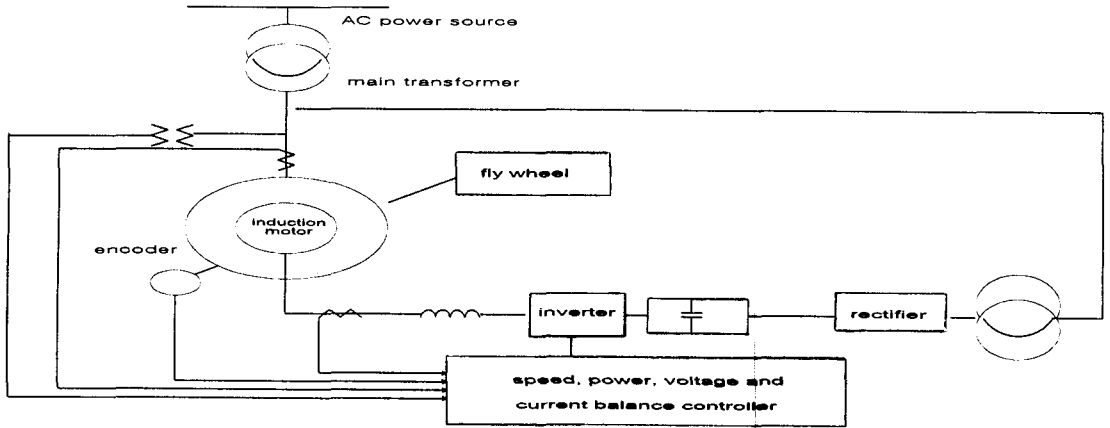


Fig. 2 Configuration of proposed system

link단의 마지막에 연결되어 있는 커패시터에는 고장전력 발생시 유도기의 2차측에 필요한 전압을 인가할 수 있는 DC 전압이 충전되게 된다. 그리고 빠른 과도응답성능을 얻기 위하여 높은 스위칭 주파수가 요구되었다. 따라서 실제 구현을 한다면 IGBT 같은 소자가 적합할 것이다.

3. 모의를 위한 간략화된 회로 및 제어기 설계

3.1 유도기의 좌표변환 이론

제어블록 다이어그램에서 제어를 위한 입력변수와 오차상수는 모두 공간벡터 개념을 이용한 것이다. 이는 상변환(3상 - 2상)을 한 후에 이를 좌표변환(동기 - 정지)하여 사용한다. 이런 방식은 유도기제어의 고전적 방법으로서 교류신호의 제어를 직류신호의 제어처럼 할 수 있는 장점이 있으므로 교류전동기 제어방식으로 널리 사용된다. 상변환과 좌표변환을 위한 그림은 Fig. 3과 같으며, 수식은 아래와 같다[4, 5, 6].

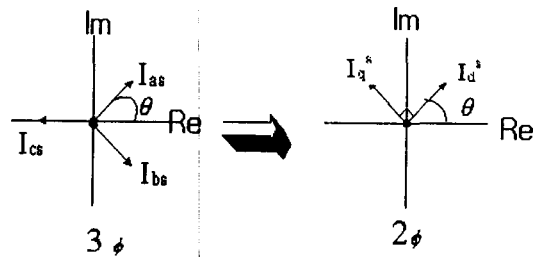


Fig. 3 Phase transformation

$$I_d^s = 2/3(I_{as} - 1/2 I_{bs} - 1/2 I_{cs})$$

$$I_q^s = 2/3(\sqrt{3}/2 I_{bs} - \sqrt{3}/2 I_{cs}) \quad (3.1)$$

$$I_{as} = I_d^s$$

$$I_{bs} = \sqrt{3}/2 I_d^s - 1/2 I_q^s$$

$$I_{cs} = -\sqrt{3}/2 I_d^s - 1/2 I_q^s \quad (3.2)$$

$$I_d^c = \cos \theta I_d^s + \sin \theta I_q^s$$

$$I_q^c = -\sin \theta I_d^s + \cos \theta I_q^s \quad (3.3)$$

$$I_d^s = \cos \theta I_d^c - \sin \theta I_q^c$$

$$I_q^s = \sin \theta I_d^c + \cos \theta I_q^c \quad (3.4)$$

$$\text{유효전력} = 3/2 (I_d^s \cdot V_d^s + I_q^s \cdot V_q^s)$$

$$\text{무효전력} = 3/2 (V_d^s \cdot I_q^s - I_d^s \cdot V_q^s) \quad (3.5)$$

여기서, I_{as} , I_{bs} 및 I_{cs} 는 3상전류이며, I_d^s 및 I_q^s

는 3상을 2상으로 상전환했을 때의 정지좌표계에서의 d 및 q축 전류이다. I_d° 및 I_q° 는 동기좌표계의 d 및 q축 전류이다.

고정자에 3상코일이 감겨져 있을 때 각각에 흐르는 전류는 2상으로 변환하였을 경우 정지좌표계와 동기좌표계로 나뉘며, 정지좌표계는 고정자 축에서 본 값이므로 이는 비동기된 신호로서 정현파가 되고, 이를 다시 식 (3.3)에 의한 좌표 변환 공식을 사용하면 동기좌표계로 변환된다. 동기좌표계는 유효축과 무효축으로 나뉘고, 유효분 전류는 계통에서 유효전력에 영향을 미치며 무효전류는 무효전력과 관계한다. 따라서, 전력 제어를 위하여 계통의 3상전원을 2상으로 바꾼 후 이를 동기좌표계로 해석하면, 유효전류와 무효전류로 분리되어 유효전력과 무효전력을 제어할 수 있게 된다. 그리고 위에서 공간벡터 개념은 전압, 전류와 자속에 모두 적용될 수 있다. 여기서, 유효성분을 d-component로 하고, 무효성분을 q-component로 하였으며, 전류를 기준으로 나타내었다.

식 (3.1)은 3상전류를 2상으로 변환하는 식이며, 식 (3.2)는 그 역행렬이다. 식 (3.3)은 식 (3.1)에서 구한 2상전류를 동기좌표계로 바꾸는 식이며, 식 (3.4)은 동기좌표계로부터 정지좌표계로 변환하는 식이다. 식 (3.5)은 1차측에서 전압과 전류를 센싱받아 유효 및 무효전력을 구하는 식이다. 여기서, θ 는 회전기의 회전 위상각이며, 계통에서의 공간벡터는 전원의 전압, 전류 위상각을 θ 로 하여 계산하게 된다. 그리고, 식 (3.5)은 유효 및 무효전력을 상변환하여 구하는 식이다. 여기서, V_d° 와 V_q° 는 3상전압을 센싱받아서 위의 식 (3.1)에 의하여 같은 방식으로 계산한 전압의 정지좌표계 표현이다. 그리고, I_{as} , I_{bs} 및 I_{cs} 는 선간에 흐르는 전류 실효치이다.

3.2 시스템의 제어

Fig. 4는 제어블록 다이어그램이다. 전체 블록은 크게 1차측의 전압과 유효전력 두가지를 제어하기 위한 것이다. 여기서 전력을 제어할 경우

에는 하단의 전압제어 루프를 정지(locked)하며, 반대로 전압제어를 할 경우에는 위의 전력제어 루프를 정지(locked)시켜야 한다. 전체 제어루프는 크게 가변속 발전시스템(adjustable speed generation system)의 전압과 전력을 제어하기 위한 주 루프(major loop)와 회전자 축의 유효 및 무효전류를 측정하기 위한 종속루프(minor loop)로 구성되어 있다. 여기서, 유효전력을 선별적으로 제어하기 위하여 속도제어 루프는 유효 전력제어기의 전단에 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 회전자 축에 연결된 속도측정기(encoder)를 통하여 속도를 센싱받아서 이를 속도지령치와 비교하게 된다. 그리고, 이 속도 오차값은 속도제어기를 통과하게 되고, 이는 유효 전력 지령치와 더해져서 유효전력 제어기를 거쳐 유효전류의 지령치를 발생한다. 이때 2차측 즉 회전자에 가해지는 슬립전원의 주파수와 전류를 센싱받고, 센싱받은 3상전류는 유효 및 무효전류 측정기를 통하여 상변환을 하고, 이를 통하여 계산된 유효전류는 유효전류 지령치와 비교되어 유효전압 지령치를 생성한다. 이때 유효전력을 제어하기 위해서는 무효전류 제어루프는 정지상태가 된다. 여기서, 속도제어기(speed regulator)와 유효전력 제어기(active power regulator) 그리고 전압제어기(ac voltage controller)는 모두 PI제어기를 사용하였으며, 전류를 유효 및 무효전압으로 바꾸는 과정인 current regulator는 전압 레퍼런스 값을 생성하기 위하여 전류 지령치와 센싱받은 모터의 2차측 전류의 차를 PI제어기로 보상하는 방식을 사용했다. 전압제어는 PT에서 센싱받은 전압에 이상이 있을 경우에 정상상태의 전압을 전압지령치로 정하고, 이를 센싱받은 전압과 비교하여 전압제어기를 통과하여 무효전류 지령치를 만들고, 이를 2차측에서 센싱받아 계산한 무효전류와

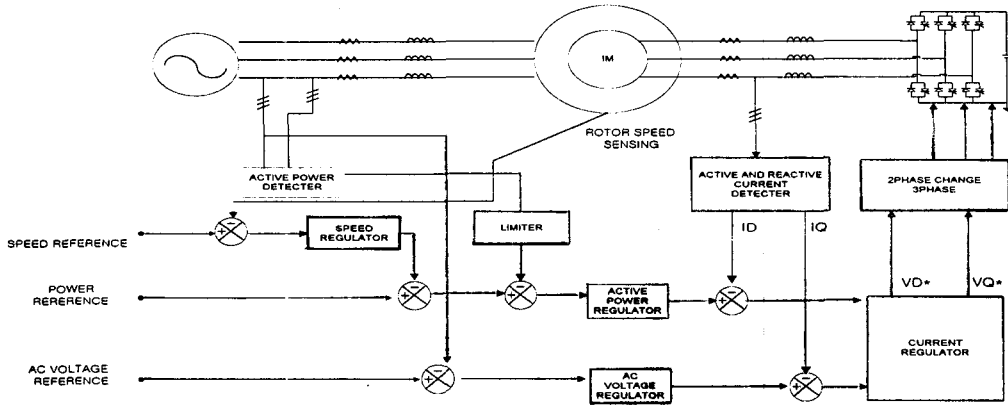


Fig. 4 Simplified simulation model and control block diagram

비교하여 무효전류의 오차값을 생성한다. 그리고 이 값은 PI제어기를 거쳐서 무효전압의 지령치가 되고, 이 전압을 상변환(2상 - 3상) 하여 인버터에 가한다. 그리고 상변환과 좌표변환을 위해서는 3.1절에서 언급한 공식[식 (3-1) ~ 식 (3-4)]을 사용하였으며, 위의 제어블록 다이어그램은 EMTP의 TACS(Transient Analysis of Control Systems)로 프로그래밍하였다.

4. 모의시험 결과 및 고찰

모의시험 과도응답 반응이 우수한 EMTP를 사용하였으며, 모의시험에 사용된 유도전동기의 상수는 Table 1에서 보는 바와 같다.

Table 1 Parameters of wound rotor induction motor

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

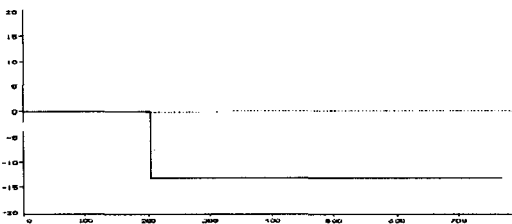
여기에서 사용된 유도전동기는 EMTP에서 UM TYPE4형식 DC link 단에서 인버터 전단의 정류기를 통과하여 DC 커패시터에 충전된 전압

이 일정하다는 가정 하에 인버터와 연결된 DC link단을 생략함으로써 모의를 위한 회로도를 사용했다. 시스템을 모의하기 위하여 EMTP(Electro Magnetic Transient Program)에 적합하도록 하기 위하여 회로도를 간략화하였다. 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 구동 방식은 SPWM(정현파 비교 방식)이며, 인버터의 구동전원은 DC 커패시터에 충전된 전압에 해당하는 DC 전원을 바로 사용하였다. 그리고 계통 측에 연결된 계기용 변압기와 계기용 변류기인 PT 와 CT는 전압과 전류를 센싱받는 역할을 하게되며, 회전자 측의 전류는 3상전류를 센싱받아서 제어의 입력변수로 사용하게 된다.

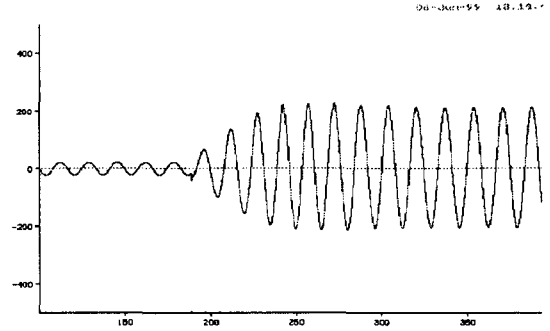
Fig. 5는 유효전력보상시 과도응답을 보여주고 있다. Fig. 5에서 X축은 모두 시간(msec)의 함수이다. Fig. 5(a)는 유효전력의 기준값이다. 약 200 msec에서 고장전력이 발생하였다고 가정하고 모의를 하였을 때, 유효전력이 보상되는 것을 Fig. 5(b)에 나타내었다. 여기서 유효전력의 과도응답 반응시 높은 서지가 유도되는 것은 플라이휠이 갖는 높은 관성력 때문인데, 이를 줄이기 위하여 유효전력을 일정량 이하로 제한하였다. 그리고 약 100 msec 이내에 응답한다는 것을 확인하였

다. 그리고 유효전력이 보상되는 방향이 전원 측에서 관찰할 때는 방향이 반대이므로 (-)의 기준값이 가해졌음을 알 수 있다.

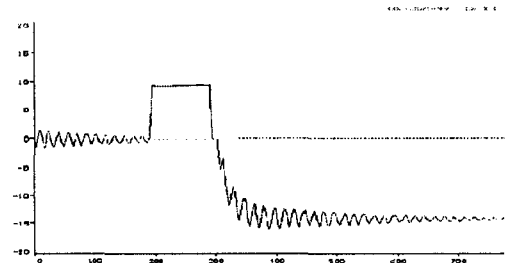
Fig. 5(c)는 과도응답시에 전동기의 2차측에 흐르는 전류이며, Fig. 5(d)는 보상에 슬립주파수가 증가하는 것을 보여준다.



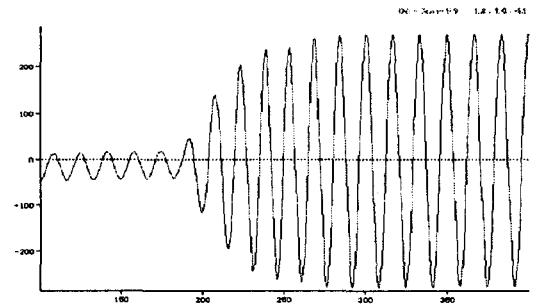
(a) 유효전력의 기준값



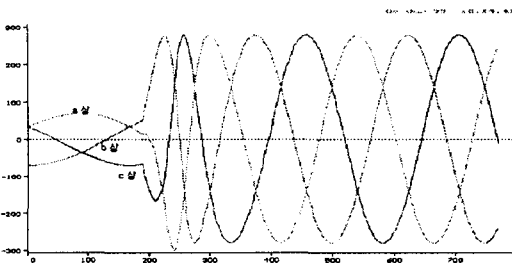
(e) 고정자 측의 전압



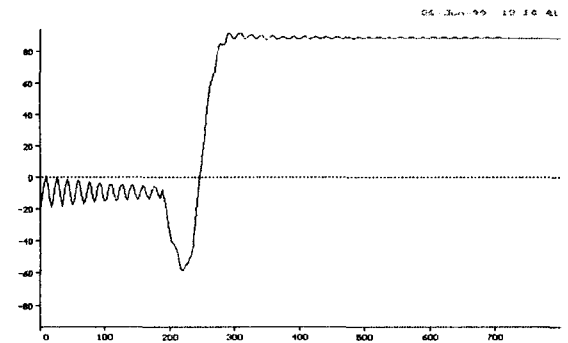
(b) 유효전력의 과도응답



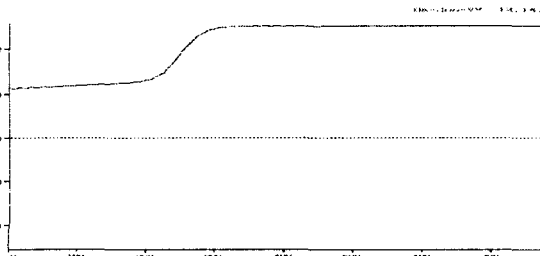
(f) 고정자 측의 전류



(c) 2차측 전류 (a,b,c 상)



(g) 무효전력의 과도응답



(d) 슬립주파수의 변화

Fig. 5 Compensation of active power

Fig. 5(e) 및 Fig. 5(f)는 1차측 전압과 전류 파형인데, 여기서 2차측의 변화에 의하여 유도기는 발전기 모드로 변환되어, 1차측에 고장전력을 보상할 수 있는 전력을 공급하게 된다. 그리고 1차측의 주파수는 변동이 되지 않고(60 Hz 유지) 안정한 전력공급이 이루어짐을 확인할 수 있으며, 약 200 msec에서부터 과도적으로 전압과 전류의 크기가 증가함을 볼 수 있다. Fig. 5(g)는 이때의 무효전력 보상파형이다.

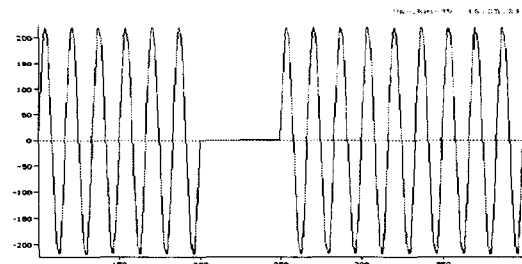
Fig. 6은 플라이휠이 갖는 축적 에너지를 이용하여 고장시 전력보상 효과를 확인한 것이다. 이는 전동기 모드에서 플라이휠이 에너지를 축적하여, 고장시 즉, 1선 지락과 같은 경우에 에너지를 1차측에 회생시켜 안정적인 과도응답 반응을 보이는 것을 의미한다. 약 200 msec에서부터 50 msec 동안 1선 지락을 가정하여 유효 및 무효전력의 보상을 관찰하였다.

Fig. 6(a)는 지락시 1차측에 가해지는 a상의 전원전압이며, Fig. 6(b)는 이때 1차측에 흐르는 전류이다. Fig. 5에서의 1차측 전류에 비하여 과도 반응시 진폭의 변화가 심함을 알 수 있다.

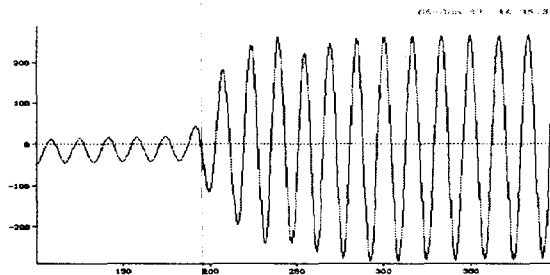
Fig. 6(c) 및 Fig. 6(d)는 유효 및 무효전력의 과도응답 반응을 보여준다. 역시 Fig. 5에 비하여 진폭의 변화가 심함을 확인할 수 있다. 그러나 거의 같은 시간내에 전력보상이 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 고장시에도 설계된 시스템에 의하여 연속적인 전력공급이 가능함을 확인한다.

5. 결 론

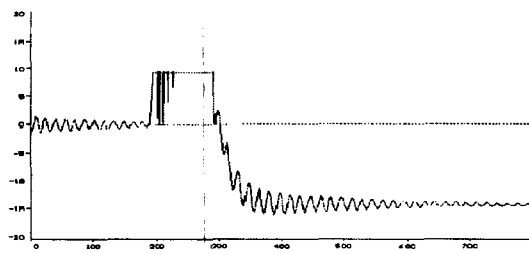
전력계통에서 발생하는 고장전력은 실제 작은 변동에도 많은 부하에 영향을 미치게 된다. 최근에는 부하가 점점 다양해짐에 따라서 이를 보상하는 전력제어의 요구가 증대되었다. 따라서 본 논문에서는 계통에서 발생할 수 있는 고장발생 시에 플라이휠이 갖는 에너지 저장기능과 유도기 시스템을 이용하여 계통에 전력을 공급할 수 있는 특징과 이를 통하여 에너지 저장 및 역률개선으로 인한 에너지절약효과를 동시에 가져올 수 있음을



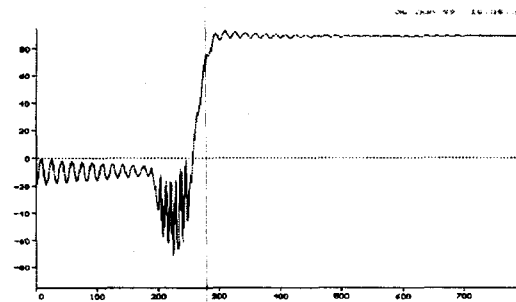
(a) a상 전원전압



(b) 1차측 전류



(c) 유효전력의 과도응답



(d) 무효전력의 과도응답

Fig 6. Power compensation during line ground fault

확인하였다. 이는 플라이휠 시스템이 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 보이며 이를 바탕으로 고전력을 필요로 하는 전동차량에서 에너지 절약과 전력안정기로서 본 시스템이 갖는 이점을 적용할 수 있을 것이다.

참고 문헌

1. Hirotaka Chikaraishi, Minoru Arimitu, Yi Wang, 1993, "Fast response power stabilizer using ac - excited generator", T-IEE, Vol.113-D, NO.11, pp1254~1261
2. Hirofumi Akagi, 1998, "Control strategy and dynamic preformance of a double-fed flywheel generator/motor", T-IEE, Vol.118-D, No.11, pp313~318
3. M. Hombu, 1995, "Harmonic analysis on a slip -power recovery system fed by a DC link GTO converter", EPE 95, pp3-239~3-244
4. A. M. Trazynalowski, 1994, "The field orientation principle in control of induction motor", Kluwer Academic Publishers, Chap.1, pp20~58
5. B. K. Bose, 1986, "Power electronics and ac drives", Prentice Hall
6. D. W. Novotny and T. A. Lipo, 1996, "Vector control and Dynamics of AC drives." Oxford, Chap.4~8
7. 1991, "A study on the theory and applications of the electromagnetic transients program(EMTP)", 한국전력공사 기술연구팀
8. 1989, "EMTP revised rule book version 2.0", Systems Control Division of Power Automation, Inc, palo alto, california, 1989