

권선형 유도발전기의 CVCF 발전을 위한
2차 여자제어법에 관한 연구(III)

안진우 이일천 황영문
거제전대 동명전대 부산대학교

A Study on the CVCF Control of Wound Rotor Induction
Generator by 2nd Excitation(III)

JinWoo AHN IIchun LEE YoungMoon HWANG
Geoje J. C. Dongayung J. C. Pusan Nat'l Univ.

ABSTRACT

This paper deals with the control strategy for the constant voltage, constant frequency(CVCF) generation of doubly-fed induction generator. As an induction machine is a nonlinear and multivariable machine, so, the control system is needed a very sophisticated control processes to meet a CVCF condition.

In this paper, control system is constructed and tested using the suggested excitation equation. The test results show that the suggested equation and control system are very useful strategy for the CVCF control of induction generator.

1. 서론

일정한 회전속도를 유지하기 어려운 동력원에서 전기적에너지를 얻는 장치로 유도발전기가 그 효용성을 인정받고 있다. 유도기의 발전기로서의 동작은 유지보수가 간단하고 별도의 여자시스템을 부과하지 않아도 되어, 자립형으로 구성이 가능하기 때문이다. 그러나 유도기는 근본적으로 비선형 다변수함수이며 전압, 주파수 및 무효전력의 제어능력이 없기 때문에 여자에 필요한 여자전류를 연결된 계통에서 공급받아야 하며, 정주파수, 정전압이 요구되는 상용전원으로서의 조건을 만족시키기 위해서는 복잡한 제어과정을 거쳐야 하고 신뢰성 및 실용성의 측면에서도 검토의 여지가 많이 남아 있는 실정이다.¹⁾²⁾³⁾ 이미 복수입출력기인 권선형유도기를 이용하여 정전압, 정주파수 발전을 위한 여자조건식을 제안하고 제안된 식을 이용하여 정상

상태 특성을 검토한 바 있다.

본 논문에서는 제안한 여자식을 이용하여 제어시스템의 구성을 검토하고 제어특성을 알아 보고자 한다. 제어시스템은 복잡한 연산식을 수행할 수 있어야 하고 제어의 가변성을 위해 마이크로프로세서를 이용한 디지털 제어시스템을 이용하였다.

2. 유도발전기의 여자식

2.1 유도발전기의 여자식

일반적으로 유도기는 2차여자에 의해 속도 및 역률을 제어하면 동기속도 상하의 임의의 속도에서 발전기로 동작시킬 수 있다. 그러므로 유도기가 전동기 또는 발전기로 동작하는 것은 에너지의 흐름이 변하는 것이지 기계의 특성이나 등가회로가 변하는 것은 아니다. 그러므로 일반적으로 이용되는 유도기의 표현식을 이용하여 제어방정식을 유도해야 할 것이다. 식(1), (2)는 유도기의 전압방정식이다.^{4),5)}

$$\vec{V}_s = R_s \vec{I}_s + L_s \frac{d}{dt} \vec{I}_s + M \frac{d}{dt} (\vec{I}_r e^{j\omega_r t}) \quad (1)$$

$$\vec{V}_R = R_r \vec{I}_R + L_r \frac{d}{dt} \vec{I}_R + M \frac{d}{dt} (\vec{I}_s e^{-j\omega_r t}) \quad (2)$$

\vec{V}_s : 고정자 전압벡터
 \vec{V}_R : 회전자 전압벡터
 R_s : 고정자 저항
 R_r : 회전자 저항
 L_s : 고정자 자기인덕턴스
 L_r : 회전자 자기인덕턴스
 \vec{I}_s : 고정자 전류
 \vec{I}_R : 회전자 전류
 ω_r : 회전자회전속도

유도발전기는 무부하 상태에서도 부하 상태에서도 항상 일정 한 단자전압을 유지해야 한다. 이 두 조건을 이용하여 유도기의 CVCF발전을 위한 제어조건을 유도해 보면,

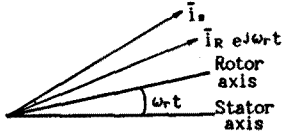


그림1. 고정자속을 기준한 전류벡터
Fig.1 Current vector in stator coordinator

1) 무부하 조건

발전기의 출력단과 부하가 연결되지 않으면 부하전류가 흐르지 않는다. 즉, $I_s = 0$ 인 경우이다.

$$\bar{V}_s = M \frac{d}{dt} (\bar{I}_{RO} e^{j\omega_r t}) \quad (3)$$

$$\bar{V}_{RO} = R_r \bar{I}_{RO} + L_r \frac{d}{dt} \bar{I}_{RO} \quad (4)$$

와 같이 된다.

ii) 부하 연결조건

발전기의 출력단에 부하가 연결되면 $I_s \neq 0$ 인 경우이다. 즉, 식 (5), (6)과 같다.

$$\bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + L_s \frac{d}{dt} \bar{I}_s + M \frac{d}{dt} (\bar{I}_R e^{j\omega_r t}) \quad (5)$$

$$\bar{V}_R = R_r \bar{I}_R + L_r \frac{d}{dt} \bar{I}_R + M \frac{d}{dt} (\bar{I}_s e^{-j\omega_r t}) \quad (6)$$

식 (3)과 (4)와 식 (5)와 (6)의 조건을 이용하여 풀면

$$\begin{aligned} \bar{I}_R &= \bar{I}_{RO} + \bar{I}_{RE} \\ &= (V_s/X_m) e^{j(s\omega_s t - \theta)} + (|Z_s|/X_m) I_s e^{j(s\omega_s t - \theta_s - \theta_L + \theta_s)} \end{aligned} \quad (7)$$

와 같이 되고 결국 회전자 전류나 전압을 조정함으로써 고정자전압을 항상 일정하게 할 수 있음을 알았다.⁶⁾

3. 제어시스템의 구성

3.1 제어시스템의 구성방법

앞에서 제안한 여자조건식을 이용하여 제어시스템을 구성하였다. 발전기는 자어식으로 구성될 수 있으면 보다 바람직하나, 본 연구에서는 여자조건식을 제안하고 이의 타당성을 검토하

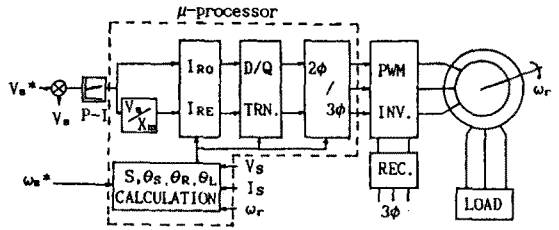


그림 2 유도발전기 제어시스템
Fig 2 Induction generator system

는 범위로 한정하였으므로 여자전원을 외부에는 공급하는 시스템을 구성하고 실험을 행했다. 제어시스템중 인버터와 정류기는 유도발전기의 회전자에 CVCF 발전을 위해 전압을 인가하거나 전류를 주입하기 위한 전력변환장치이다. 그러므로 회전자의 속도에 따라 즉 슬립의 정,부에 따라 양방향으로 전력이 흐를 것이고 결국 양방향성으로 구성해야 할 것이다. 그러나 동기속도 이상의 회전시에도 제어원리는 근본적으로 동기속도이하와 같으므로 본 연구에서는 동기속도이하의 범위에서 동작하는 경우만으로 한정하였다.

마이크로프로세서는 검출된 각종 정보와 기준량(명령치)을 이용하여 앞서 제안한 제어원리에 의해 연산된 신호를 인버터에 보낸다. 이러한 연산과정을 여자전류방향으로 살펴보면 식 (7)에서

$$\bar{I}_R = e^{j(s\omega_s t)} [I_{RO} e^{-j\theta_s} + I_{RE} e^{-j(\theta_s + \theta_L - \theta_s)}] \quad (8)$$

여기서

$$I_{RO} = V_s/X_m \quad (9)$$

$$I_{RE} = |Z_s| I_s/X_m \quad (10)$$

이다. 여기서 I_{RO} 는 무부하시 정격출력전압을 형성시키기 위한 성분이고 I_{RE} 는 부하를 인가했을 때 이것에 의한 전압강하를 보상하는 성분이다. 회전자인가전류의 주파수는 $s\omega_s$ 로 정해지고 그 크기는 D,Q 좌표법에 의해서 계산하면

$$i_\alpha = I_{RO} \cos\theta_r + I_{RE} \cos(\theta_r + \theta_L - \theta_s) \quad (11)$$

$$i_\beta = -I_{RO} \sin\theta_r - I_{RE} \sin(\theta_r + \theta_L - \theta_s) \quad (12)$$

와 같이 된다. 또 이 값을 2속/3속 변환에 의해 3상으로 변환하면 각상의 주입 전류치는

$$i_a = i_{\alpha} \quad (13)$$

$$i_b = -(1/2)i_{\alpha} - (3/2)i_{\beta} \quad (14)$$

$$i_c = -(1/2)i_{\alpha} + (3/2)i_{\beta} \quad (15)$$

와 같이 된다. 즉 인버터를 통해 회전자에 주입해야 할 전류 i_a, i_b, i_c 는 식 (13)(14)(15)로 주어진다. 마이크로 프로세서를 이용한 연산제어과정은 그림 2에 나타내었다. 기준전압과 기준주파수, 부하의 상태에 따라 공극전압을 계산하고 이 값에 의해 X_m-E_g 의 관계에서 여자 리액턴스를 계산한다. 주어진 유도기의 각종 상수값과 검출한 전기량을 이용하여 주입전류 I_{ro}, I_{re} 를 연산하고 다시 D-Q 변환, 2 ϕ /3 ϕ 변환을 거쳐 i_a, i_b, i_c 의 3상기준 주입전류를 연산해 낸다.

3.2. 제어 시스템의 하드웨어

발전기에서 고정자 전압, 전류, 회전속도를 검출하여 마이크로 프로세서가 연산을 행할 수 있도록 하기 위하여 슬립과 위상각, 실효값등으로 연산을 행하는 데, 연산속도와 제어의 복잡성을 피하기위해 아날로그회로를 이용하였다. 제어시스템의 하드웨어를 알아보자.

3.2.1. 위상 검출기

전류 i_a 는 전압 v_a 보다 θ_L 만큼 늦다고 가정하고 역률각 θ_L 을 구하는 원리를 알아보자. 전압과 전류를 히스테리시스 비교기에 통과시키고 양의 값만 취하면 그림 3의 상단 두 그림이 된다. 여기서 전압, 전류를 히스테리시스 비교기에서 구형파로 만든 것은 제로 크로싱(zero crossing) 부근에서의 파형왜곡에 따른 오차를 줄이기 위해서이다. 그리고 이 두 값을 AND 하면 그림 3의 최하단 그림과 같이된다. 여기서 하이구간을 T_H , 로우 구간을 T_L 이라

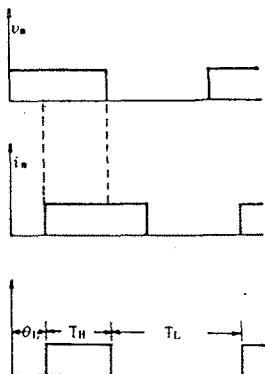


그림 3 위상검출의 원리
Fig.3 Principle of phase detector

하면 주기와 위상과의 관계에서

$$\theta_L = \pi(T_H - T_L) / (T_H + T_L) \quad (16)$$

식 (16)와 같이 쓸 수 있어 결국 주기를 이용하여 위상차를 계산할 수 있다. 위상차를 연산하는 시간은 다른 데이터를 받아들이는 시간보다 상대적으로 길다. 즉 최소한 전원의 한 주기는 경과해야 한다. 그러므로 마이크로프로세서의 CPU가 이 주기값을 계속 카운터할 수는 없다. 그래서 본 실험에선 8254 타이머를 이용하여 하이구간과 로우구간의 지속시간을 카운팅하고 CPU는 시작과 끝만을 제어하고 그 결과치만 이용하여 카운터의 실행 시간동안 CPU는 다른 과정을 수행하게 한다.

3.2.2. 실효치 변환기

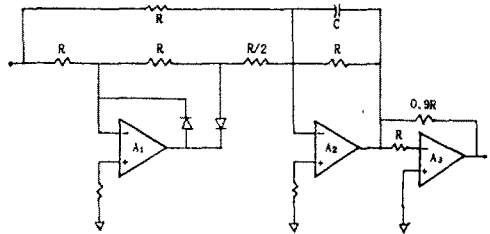


그림 4 실효치 변환기
Fig.4 R.M.S converter

연산증폭기 A_1 과 A_2 는 입력파형의 평균절대값(mean absolute value)를 구하기 위한 회로이다. A_3 는 이 값을 실효치로 변환시키기 위한 연산증폭기이다.

3.2.3. 인터페이스 회로

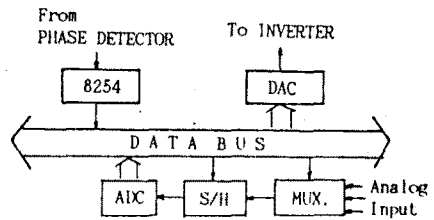


그림 5 인터페이스 회로의 블록도
Fig.5 Block diagram of interface circuit

본 실험에서는 IBM PC/AT 퍼스널 컴퓨터를 이용하여 전체 시스템을 제어한다. 외부의 아날로그데이터를 받아들여 컴퓨터에서 연산하고 그 결과를 명령으로 보내내는 인터페이스 회로의 구성도는 그림5 에 나타내었다. 여러개의 아날로그 데이터는 멀티플렉스에 의해 하나가 선택되어 지고 이를 샘플/홀더를 통해 아날로그/디지털변환을 행하여 컴퓨터의 메모리에 저장하게 된다. 또 위상차를 계산하기위해 8254 타이머를 이용하여 하이와 로우구간을 카운트 한다. 앞에서 언급하였듯이 위상검출에 소요되는 시간이 길므로 CPU는 인터럽트 신호에 의해 카운터의 값만 읽고 다른 과정을 수행 할 수 있다. 이렇게 하면 실행시간도 줄일 수 있으며 받아들인 데이터의 신뢰도를 높이는 작업도 병행할 수가 있다. A/D변환기의 정도는 12bit 이며 변환속도는 100KHZ로 약 10 μ s의 변환 시간이 소요된다. 여기서 데이터를 획득하여 A/D변환을 행하고 메모리에 저장시키는 동작은 실행시간을 줄이기 위해 어셈블리어를 사용하였다.

3.2.4. 전력변환기

제어부에서 발생된 회전자주입전압 또는 전류를 증폭하여 회전자에 인가하는 부분이다. 정류기는 다이오드형 전파정류기이다. 주파수변환기는 전류형 또는 전압형 인버터, 사이클로인버터등을 고려할 수 있다. 전류형인버터는 4상한제어가 가능하고 제어가 용이하며 신뢰도가 비교적 높으나 기기의 정수 특히 누설리액턴스와 부하에 따라 정류작용의 영향이 크고 전압스파이크가 크며, 과도상태특성이 좋지못하며 특히 경부하시 안정도등이 문제가 된다. 또 저주파수로 동작해야하는 본 실험에서는 적합하지 못하며 이에 비해 전압형은 제어시스템이 비교적 안정하고 구성이 쉬우며 기기정수의 영향이 적고, 또 고조파제거용 필터의 사용에 제한이 적으며 4상한 제어도 역병렬 접속으로 가능하다. 사이클로인버터의 경우 저주파수를 인가해야 하는 본 실험에 적합하나 제어 회로의 구성이 복잡하여 고려하지 않았다. 그러므로 제어회로를 구성하여 특성을 검토하는 본 연구에서는 전압형인버터가 적당하다. 또한 전력흐름을 양방향성으로 하면 발전기의 운전율 동기속도 상하의 임의의 속도에서 가능하나 원리적인면은 같으므로 일방향성으로 하고 동기속도 이하로 한정하였다.

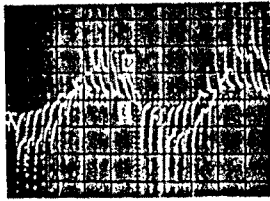
3.3 제어시스템의 소프트웨어

본 실험은 퍼스널 컴퓨터를 이용하여 제어를 행한다. 수행시간의 단축과 제어프로그램의 가변조정성을 부여하기위해 고급언어인 파스칼과 어셈블리어를 링크하여 사용하였다. 여기서 어셈블러는 데이터의 획득 및 A/D변환, 데이터의 저장부분을, 파스칼은 전체 제어시스템을 통괄하며 획득한 데이터를 이용하여 연산과 제어신호의 발생부분을 담당한다. 제어시작 명령과 함께 CPU는 8254 타이머의 입력값에서 하이구간을 점검한다. 하이구간이 점검되면 데이터획득(data acquisition)이 시작되어 순차적으로 V_s, I_s, S 의 값을 받아들여 A/D변환시키고 이를 메모리에 저장한다. 이 과정중에도 8254타이머의 입력이 로우로 변하면 하이구간의 카운트값을 저장하고 다시 카운터를 시작한다. 이때 T_H 구간은 1/2 주기 보다 길 수가 없으며 T_L 은 1/2주기보다 짧을 수가 없으므로 T_H 구간동안은 여러개의 데이터를 받아들이고 T_L 구간동안은 데이터의 가공을 행하게 한다. 즉 T_H 구간동안 전압, 전류, 슬립의 데이터를 7개씩 받고 T_L 구간동안은 받아들인 데이터의 크기를 비교하여 최고값과 최저값은 버리고 나머지 5개의 데이터를 평균한다. 또 T_H 와 T_L 의 값을 2회의 주기에 걸쳐 받아들여 데이터의 신뢰성을 높인다. 결국 T_H, T_L 은 각 2개의 데이터를, 그 외의 데이터는 10개의 데이터를 받아 평균하여 사용하게 된다. 공극전압 E_g 는 부하전류의 크기와 역률에의해 정해지는 값이다. X_m-E_g 의 관계를 고차함수로 근사화했기 때문에 계산에 소요되는 시간을 줄이기위해 0.1 V 간격의 E_g 에 대한 X_m 의 값을 계산하여 제어를 시작하기 전에 테이블화하여 메모리에 저장시킨다.

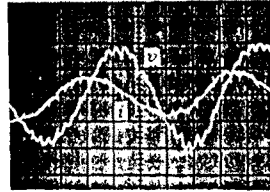
모든 변수의 값이 정해지면 실행프로그램인 파스칼이 순차적으로 연산하여 명령치를 출력한다.

4. 실험 결과

앞 절의 제어회로에서와 같이 회전자에 인가하는 전압은 PWM 인버터의 출력인 펄스파이고 그 결과 발전기의 출력전압은 고조파성분이 많이 포함된 파형이다. 부하를 연결하면 그림6의 (a)와 같이 전압스파이크는 다소 감소되나 고조파성분은 여전히 존재한다. 이를 제거하기위해 출력단자에 L-C필터(L=2mH, C=9 μ F)를 연결하면 그림6의 (b)와 같이 상당히 줄일 수가 있다.



(a)



(b)

그림 6 출력전압파형 (a)부하연결시(b)필터연결시
Fig.6 Output voltage (a) loaded (b) filtered

구성한 유도발전기 제어시스템은 비교적 정확한 제어특성을 가지나 원동기의 속도변화에 다소 영향을 받았다. 그림 8은 속도가 변화할때 출력특성을 나타낸 것이다.

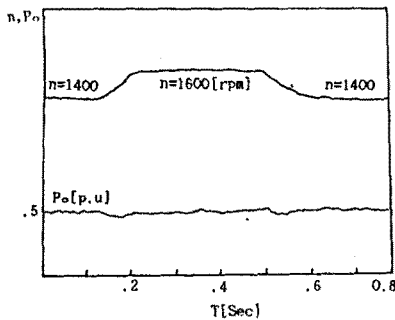


그림 7 속도변화에 따른 출력의 변화
Fig.7 Output variation due to speed change

5. 결론

본 연구에서는 유도기의 CVCF발전을 위해 제안한 여자조건식으로 유도발전기 제어시스템을 구성하고 정상상태 특성을 검토하였다. 유도 발전기는 근본적으로 동기발전기의 특성과 비슷하여 자화리액터스의 값이 출력전압에 큰 영향을 미치고 이에 더해 교류보 여자하기 때문에 시정수 및 저항값이 중요한 영향요소로 작용하였다.

제어시스템은 복잡한 연산의 효율적처리와 제어의 가변성을 높이기 위해 80286 마이크로프로세서를 이용하였다. 출력전압의 제어는 비교적 넓은 속도범위에서 이루어 졌으며 주파수변환기의 용량이 제어범위를 제한하였다. 출력전압에 포함된 고조파성분은 주파수변환기로 인한 것으로 L-C필터에 의해 어느 정도 감소시킬 수 있었다.

앞으로 자여자 시스템을 구성하는 것과 과도특성을 해석하여 안정도 측면을 고려해야 할 것이다.

參考 文獻

- 1) J.E Barkle, R.W. Ferguson, "Induction Generator Theory and Application" AIEE. Feb. pp 12 19. 1954.
- 2) R.E. Bedford, "The synchronous double-fed Induction Machine" AIEE. Feb. pp 1456 1491. 1957.
- 3) M.Riaz, "Energy-Conversion Properties of Induction Machine in Variable-speed Constant-frequency Generation System." AIEE. Trans. Mar. pp 25 30. 1959.
- 4) F.J. Brady, "A Mathematical Model for the Doubly-fed Wound Rotor Generator." IEEE PAS-103.No.4 pp 789-802 1984.
- 5) W. Leonhard, "Control of Ac-machines with the Help of Microelectronics" IEEE. Microcomputer Control of Power Electronics and Drives pp 333 356, 1987.
- 6) 안진우, 황영문, "권선형 유도발전기 CVCF를 위한 2차여자 제어법에 관한 연구(II)", 대한전기학회 추계 학술대회 논문집 PP 45-48.1990
- 7) A.K.Tandon, S.S.Murthy, G.J.Berg, " Steady state Analysis of Capacitor Self-excited Induction Generator " IEEE.Trans. PAS - 103. No.3 pp 612 - 618. Mar. 1984
- 8) H.L.Nakra, Benoit Dube, "Slip Power Recovery Induction Generator for Large Vertical Axis Wind Turbines " IEEE Trans. EC - 3, No.4. pp 733 - 737. Dec. 1988