

부하제어 기능을 갖는 디지털형 전동기제어반의 설계 및 구현

Design and Implementation of Digital Motor Control Center Including Load Control Function

우 천 희, 강 신 준, 이 덕 규, 구 영 모, 김 학 배, 이 성 환
(ChunHee Woo, SinJun Kang, DukGyu Lee, YoungMo Koo, HakBae Kim and SungHwan Lee)

Abstract : In this paper, digital motor control center using protection relay is developed in order to protect power systems by means of timely fault detection and diagnosis during operation for induction motor which have various load environments and capacities in power systems. Digital motor control center is employed by power supervisory control systems without separate remote terminal unit and transducers adding communicational ability. Also we develop a maximum demand controller to control the load effectively at peak status and a power factor controller to minimize real power losses and improve the power factor. Therefore, when using the developed controller, real time computation is possible by loading DSP in hardware and applying real-time kernel which can convert each algorithm to task module.

Keywords : digital motor control center, demand control, power factor control, digital protection relay

I. 서론

플랜트의 대부분을 차지하는 전동기의 보호 및 제어를 담당하고 있는 전동기제어반의 중요성은 날로 증가하고 있다. 종전의 아날로그 형식의 전동기제어반은 대부분 바이메탈식 열동형 계전기, 전기기계식 전류계, 표시 램프 및 순차회로로 구성되어 있다. 바이메탈식 열동형 계전기를 사용하여 전동기를 보호하는 방식은 주위 온도에 민감하게 영향을 받으며, 구조적으로도 전압 불균형에 의한 전동기의 손상을 보호할 수가 없다[1]. 또한 케이블로 직접 결선한 기존의 순차회로는 전동기제어반의 구조를 복잡하게 하며, 시공 시 공사 기간을 길게 하고 유지 보수를 어렵게 하는 원인이었다. 최근 부하 계통이 복잡해지고 그에 따른 전력 설비의 신뢰성이 강조됨에 따라, 본 연구에서는 삼상 유도전동기를 고장으로부터 보호하고, 기동제어, 순시정전 후 자동 재기동 제어 또는 다양한 표시 기능 등을 제공할 디지털형 전동기제어반을 개발하였다. 전동기의 과부하, 결상, 역상사고는 물론 회전자구 구속되는 사고까지도 검출하는 전동기용 보호계 전기를 신뢰성 있게 구현하였으며[2][3], 설치되어진 전동기에 의하여 발생하는 지상 무효전력을 보상하여 역률을 개선하는 역률제어기 및 인입구의 전력량계로부터 발신되는 펄스량을 계측하여 피크전력을 관리하는 최대 수요전력제어기를 추가로 개발하였다.

종전에는 계측 및 계전 기능을 위해서는 전류계와 같은 메타류와 계전기가 각각 별도의 하드웨어로 구성되었으며, 또한 계측량을 전송하기 위해서는 변성기류가 필요하였으나, 디지털형 전동기제어반에서는 계측 및 계전

기능, 계측량 통신이 동시에 가능하도록 하드웨어를 구현하였다[4].

II. 디지털형 전동기제어반의 설계

전력 부하의 대부분을 저압 삼상 유도전동기가 차지하고 있으므로 전동기들을 보호하는 계전기는 전동기제어반에서 가장 중요한 역할을 담당한다[2]. 디지털형 전동기제어반에는 과전류보호, 결상보호와 같은 보호계전 요소 외에 역률제어 및 최대 수요전력제어와 같은 부하 제어 기능을 제공한다.

최대 수요전력제어기는 사용 전력량을 계량하여 표시하고 펄스 출력을 제공하는 전력량계로부터 입력받아 목

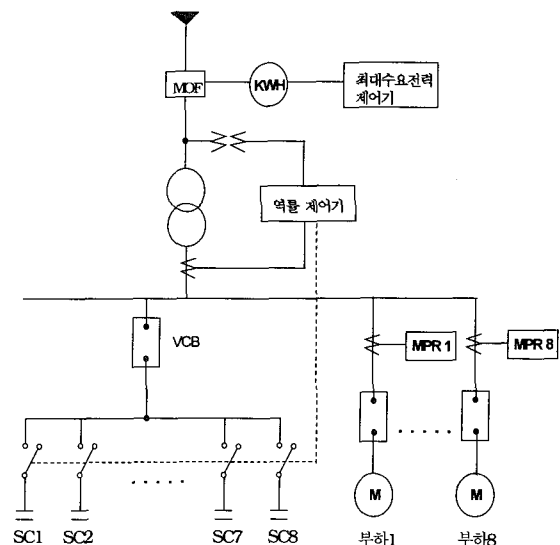


그림 1. 디지털형 전동기제어반의 적용 예.
Fig. 1. Application example of the digital mcc.

접수일자 : 1998. 11. 25., 수정완료: 1999. 7. 6.
우천희, 강신준, 이덕규, 구영모, 김학배 : 연세대학교 전기공학과
이성환 : 현대중공업(주) 마복리연구소

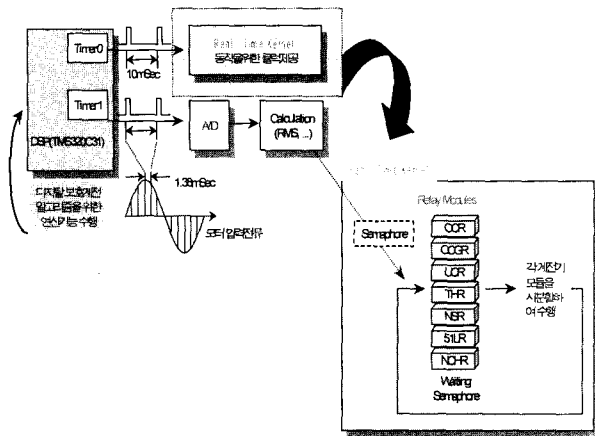


그림 2. 전동기용 보호계전기의 실시간 제어 블록도.
Fig. 2. Block diagram of the real-time control in a motor protection relay.

표 전력이 초과하지 않도록 부하를 관리한다. 또한 전동기 제어반의 기동제어에는 전동기의 용량에 따라 직입기동, Y-Δ 기동을 선택하여 적용하며, 삼상 유도전동기의 정역 운전용 순차회로를 제공한다. 또한 순시 정전시간과 재기동 시간을 설정하여 부하 전압이 순시 정전 검출 전압 이하로 떨어지고 설정된 시간 내에서 복구전압 이상으로 회복되면 전동기를 설정된 지연시간 후에 다시 운전하기 시작하는 연속 재기동 기능을 제공하고 있다.

그림 1에서는 전동기제어반을 실 계통에 적용하는 예를 단선 결선도로 보여주고 있다. 역률제어기는 변류기와 전압변성기로부터 전류와 전압을 입력받아 무효전력량 및 역률을 계산하여 역률개선용 콘덴서 SC1 - SC8을 투입 및 차단하고 있으며, 전동기용 보호계전기 MPR1 - MPR8은 고장 발생시 해당 차단기를 고속도로 트립하여 고장 파급을 방지하는데 적용한다.

1. 전동기용 보호계전기의 설계

보호계전기는 단락, 지락, 결상등 선로의 사고가 발생한 경우, 사고를 고속 차단하여 정전 범위를 최소화함으로써 사고의 파급을 방지하는 중요한 보호 장치이다[5]. 본 논문에서 연구된 디지털형 전동기 보호계전기는 하드웨어 자원과 소프트웨어 자원을 실시간 커널이 제공하는 세마포를 이용하여 우선 순위에 따라 동기화 시킴으로써, 시분할 작업을 통해 각 태스크들이 서로 충돌하지 않고 DSP를 운영하도록 설계하였다. 보호계전기에서 멀티태스킹이 원활하게 스케줄링 되어지도록 두 개의 타이머를 사용하였다. 한 개는 1.38ms 간격으로 변류기를 통해 입력된 아날로그 값을 A/D 변환하여 실효치를 구하기 위해 인터럽트를 발생시킨다.

이 과정을 모두 수행하고 남은 시간 동안 릴레이 태스크, 통신 태스크 그리고 디스플레이 태스크를 스케줄링할 수 있도록 10ms마다 Timer0에서 클럭을 제공한다. 각 인터럽트와 세마포를 사용하여 태스크를 실시간 제어하는 블록도를 그림 2에 나타내었다.

1.1 단락 및 지락과전류 계전요소

단락과전류 계전요소는 단락전류로부터 전동기를 보

표 1. 지락과전류 계전요소의 동작특성.
Table 1. Operating characteristic of the OCCR.

동작구분	동작치 정정	동작시간 특성	
		조정범위	특성
순시 동작	200-400%	50mS 이하 단일 조정	순시
한시 동작	10-40%	10단계 이상 조정 가능	반한시 및 강 반한시 초 반한시

표 2. 장시간 기동 계전요소의 동작특성.
Table 2. Operating characteristic of the 51LR.

동작구분	동작치 정정	전동기 기동 시간	동작시간 특성	
			조정범위	특성
회전자구속 보호요소	정격전류의 200-400 %	1-60 초	1-4 초	정한시
시동전류 보호요소			10 단계 이상	초 반한시

호하기 위하여 적용한다. 전동기가 처음 기동했거나 실효치와 순시 고장전류의 비가 1.0을 넘지 않는 경우는 정상운전으로 판단하며 별도의 조치는 취하지 않는다. 그러나 전류비가 1.0을 넘는 경우, 즉 입력되어진 실효치 전류에서 가장 큰 상의 전류가 순시 설정치보다 큰 경우는 단락고장으로 판정하며, 순시동작 요소가 동작하여 즉시 트립신호를 발생한다. 사고전류에 의해 회로가 트립된 후 전류 입력이 정격전류의 복귀치 이상이 되면 차단된 부하를 복구시킬 것을 명령하고 운전 상태는 정상 상태로 복구한다.

지락과전류 계전요소는 중성선 전류의 실효치를 이용하여 지락고장을 검출하고, 1상, 2상 또는 3상 지락고장으로부터 그 해당 기기 및 선로를 보호하기 위하여 적용한다. 중성선 전류의 값이 기준치 이상일 때 지락고장으로 판정하며, 고장전류의 크기와 순시 및 한시치의 설정값에 따라 지연시간을 계산하여 지연시간 이후에 차단기 트립신호를 발생한다. 지락과전류 계전요소의 한시동작은 전류-시간 특성으로서 반한시, 강반한시, 초반한시 세개의 특성이 내장되어 있으며, 사용자는 그 중 하나를 선택하여 사용한다.

1.2 장시간 기동 계전요소

장시간 기동 보호용 계전요소는 전동기의 장시간 과부하에 의한 과전류를 검출하여 회로를 차단함으로써 전동기를 보호하는데 적용한다. 표 2에서 보는 바와 같이 장시간 기동 계전요소는 전동기의 대표적인 과부하 상태인 회전자구속 상태를 보호하는 회전자구속 보호요소와 기동전류를 검출하여 전동기를 보호하는 시동전류 보호요소로 구성되어 있다. 전동기 기동후 기동시간의 2배 시간이 경과할 때까지는 시동전류 보호요소가 동작하고 그 이후에는 회전자구속 보호요소가 동작한다. 시동전류

보호요소는 초반한시 동작 특성을 따르며, 회전자구속 보호요소는 열적 동작특성을 가지므로 충분한 시간 간격 후에 동작하는 정한시 특성을 갖는다. 장시간 기동 계전 요소의 동작전류는 정격전류의 2-4배 사이에서 설정하고, 전동기 기동시간은 1-60초 사이에서 설정할 수 있으나, 동작전류와 기동시간은 기계적인 부하의 변화와 단락회로로 인한 오동작을 피하기 위해 충분히 크게 설정하는 것이 좋다.

장시간 기동 계전요소는 부하전류의 크기가 동작전류보다 큰 경우 우선 고장 발생으로부터의 경과 시간이 기동시간을 초과하였는지 확인한다. 초과한 경우에는 시동전류 보호요소를 고려하지 않아도 되며, 이 때에는 회전자구속 보호요소의 정한시 동작시간이 경과하였는가를 확인한다. 정한시 동작시간을 초과하였으면 부하 차단을 명령하며, 만일 초과하지 않은 경우에는 전류 입력에 해당하는 초반한시 특성 동작시간과 경과 시간을 비교하여 동작시간을 경과하는 경우 부하 차단을 명령한다.

1.3 열동과전류 계전요소

열동과전류 계전요소는 전동기에 유입되는 전류를 측정하여 기기의 열적 과부하를 검출, 회로를 차단함으로써 기기를 보호하는 데 사용한다. 동작시간 특성은 반한시이며, 동작전류 및 전동기의 열적 상태에 따른 열시정수에 의해 동작시간이 (1), (2) 중 하나로부터 결정된다. 냉각곡선(Cold Curve)은 전동기가 완전히 냉각된 상태(정격온도의 0%)에서 고장이 발생하였을 때 적용되는 전류-시간 특성곡선이며 동작시간은 (1)과 같이 정의한다.

$$t = \tau \cdot \ln \left[\frac{I^2}{I^2 - (1.1 \cdot I_B)^2} \right] \quad (1)$$

여기서, t:동작시간, τ :전동기 열시정수, I_B :전동기 정격전류, I:전동기의 부하전류이다.

또한 가열곡선(Hot Curve)은 고장 직전의 전동기 상태를 고려한 계전기의 전류-시간 특성을 나타내며, 전동기가 완전히 냉각되지 않은 상태에서 고장이 발생하였을 때 가열곡선이 적용된다. 이 때 동작시간은 (2)로 정의되며, 여기서 IP는 고장 전의 부하전류를 나타낸다. 동작시간 결정시 필요한 전동기 열시정수 τ 는 2부터 32까지 30 단계를 갖도록 본 연구에서는 설계되었다.

$$t = \tau \cdot \ln \left[\frac{I^2 - I_P^2}{I^2 - (1.1 \cdot I_B)^2} \right] \quad (2)$$

열동과전류 계전요소로 전동기를 과부하로부터 보호하기 위해서는 입력전류와 열동과전류 계전요소의 동작전류 비로부터 현재 전류 입력이 전동기에 열적 파괴를 일으킬 수 있는가를 결정하여야 한다. 즉 입력전류가 동작전류보다 큰 경우 열적 파괴의 가능성이 있으므로, 전동기의 상태에 따라 위의 냉각곡선과 가열곡선 중 하나로부터 현재 전류 입력에서 견딜 수 있는 시간을 구한다. 그리고 전류 입력이 동작전류를 초과하기 시작한 시각부터 경과한 시간과 비교한 후 경과 시간이 동작시간을 초과하면 부하 차단을 명령한다.

1.4 역상전류 계전요소

전동기가 운전중 개폐기의 접촉 불량 또는 퓨즈의 용단 등으로 결상이 되면 나머지 두 상에는 역상전류가 흘러 과열을 초래하며, 또한 전원 전압의 불평형으로 인한 불평형 전류도 전동기의 손실 증가와 출력 감소를 야기시킨다. 본 연구에서 역상전류 계전요소는 삼상 회로의 결상 운전 또는 불평형 운전 시 회로에 흐르는 역상전류를 검출하여 회로를 차단함으로써 기기를 보호하는 데 적용하며 정한시 동작특성을 갖는다. 삼상 부하전류 I_A, I_B, I_C 로부터 역상전류 I_N 를 검출하기 위해서는 (3)과 같은 대칭좌표법을 이용하여 구할 수 있다.

$$I_N = \frac{1}{3} (I_A + a^2 I_B + a I_C) \quad (3)$$

즉 역상전류는 C상 전류를 120°, B상 전류를 240°만큼 회전시켜 이를 A상 전류와 더하여 구한다.

2. 최대 수요전력제어기의 설계

사용 전력량이 계약 전력량을 초과하지 않도록 침두 부하를 제어하기 위해 15분 간격으로 적산 값이 소거되고 최고 지시 값이 기록되는 최대 수요전력계를 사용한다. 그러므로 침두 전력 값을 제어하기 위해서는 15분 주기와 동기를 이룬 적산전력 값을 바탕으로 하여 부하를 제어한다면 목표전력을 유지하면서 효율적인 에너지 관리를 수행할 수 있다. 한전에서 채택하고 있는 15분 주기의 디맨드시한이 시작되면 펄스 발생부 적산전력량 계로부터 일정 시간마다 입력되는 펄스의 개수를 계산하여 현재전력 및 목표 현재전력을 산출하고 디맨드 종료 시점에서의 예측전력을 산출함으로써 목표전력과 차이 에 따라 차단시킬 부하를 결정할 수 있다. 전력 제어 알고리즘에서 사용하는 전력량들을 구하는 연산식은 (4) - (7)에 나타내었으며, 이 제어변수를 사용하여 작성한 15분 전력제어 그래프는 그림 7과 같다.

$$\text{현재전력 [Pt]} = \frac{1}{\text{펄스정수}} \times \text{펄스수} \times \frac{60}{15} \quad (4)$$

$$\text{예측전력 [Q]} = \text{현재전력 [Pt]} + \frac{\Delta P}{\Delta t} \times (T - t) \quad (5)$$

$$\text{목표현재전력 [Pr]} = \frac{\text{목표전력} - \text{초기전력}}{3600} \quad (6)$$

$$\times \text{경과시간} \times \frac{60}{15} + \text{초기전력}$$

$$\text{조정전력 [U]} = \frac{\text{예측전력} - \text{목표전력}}{T - t} \times \text{디맨드시한} \quad (7)$$

여기서 펄스정수는 pulse/Kwh이며, $\Delta P/\Delta t$ 는 샘플링 시간(Δt 분)동안 증가된 전력 변화량을 나타낸다.

3. 역률제어기의 설계

역률제어기는 부하의 무효전력 값을 지속적으로 측정함으로써 목표 무효전력 이하가 되도록 콘덴서 뱅크를 투입/차단하여 역률을 개선한다. 부하의 최대 수요전력을 P[Kw], 부하 최대 무효전력을 Q[Kvar], 현재 역률을 $\cos \theta$ 라고 하면, 목표 무효전력 및 목표역률로부터 투입해야 될 콘덴서 용량 Q_c 를 (8)과 같이 구할 수 있다. 계

산되어진 콘덴서 용량을 투입하여 무효전력을 경감시키면 일정한 실비 용량, 즉 피상전력에서는 유효전력이 증가하는 효과를 얻을 수 있다.

$$Q_c = Q - Q_t \tag{8}$$

$$= P \left[\sqrt{\frac{1}{\cos^2 \theta} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \theta_t} - 1} \right] \text{ [Kvar]}$$

그러나 진상 무효전력이 콘덴서 차단치를 초과하는 경우 콘덴서 뱅크가 투입 및 차단을 반복하는 헌팅(Hunting) 현상이 발생할 수 있다. 이 현상을 방지하기 위해서는 (8)에서 구한 Q_c 를 이용하여, 차단시켜야 하는 콘덴서 뱅크 용량을 구할 수 있다[6].

$$\text{차단 콘덴서용량} \geq 1.2 \times \text{단위 최대 콘덴서용량} \tag{9}$$

제작되어진 역률제어기의 알고리즘은, 위에서 설명한 것처럼, 초기 설정된 변수를 이용하여 목표량을 산출하고 목표량을 기준삼아 부하를 제어한다. 최대 유효전력 $P=1000\text{[Kw]}$, 현재 역률이 0.75, 콘덴서 뱅크 용량이 $100\text{[KVA]} \times 8$ 인 계통을 생각해보자. 이 계통의 목표 역률을 0.95로 개선시키고자 할 때, 콘덴서 뱅크 용량을 알고 있으므로 최대 무효전력 값에서 최종 무효전력 Q_E 를 (10)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{최종 무효전력}[Q_E] &= \text{최대 무효전력} - (\text{콘덴서 뱅크 수} \\ &\quad \times \text{단위용량}) = 82\text{[KVAR]} \end{aligned} \tag{10}$$

목표 무효전력과 CPT 비로부터 콘덴서 투입, 차단치를 구하여 그림 3과 같은 제어 영역을 얻어낸다. 또한 공휴일 또는 야간의 경 부하시에 투입치보다 조금 큰 지상 무효전력 때문에 콘덴서 뱅크가 투입된다면, 진상 무효전력이 발생하게 되어 이것에 의해 전력 손실이 발생할 수 있다. 역률제어기에서는 경 부하시 모든 콘덴서 뱅크를 차단하도록 경 부하 영역을 설정하여 제어한다.

위와 같은 역률제어기의 알고리즘 및 기본과 성분을 추출하는 디지털 필터링을 구현하기 위하여 본 연구에서는 32 비트 소수점연산을 고속도로 수행하는 TI사의 DSP 칩 TMS320C31를 사용하여 하드웨어를 제작하였다.

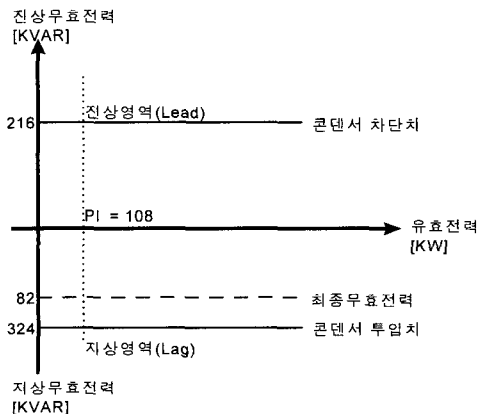


그림 3. 역률제어를 위해 산출되어진 제어영역.
Fig. 3. Control region for power factor control.

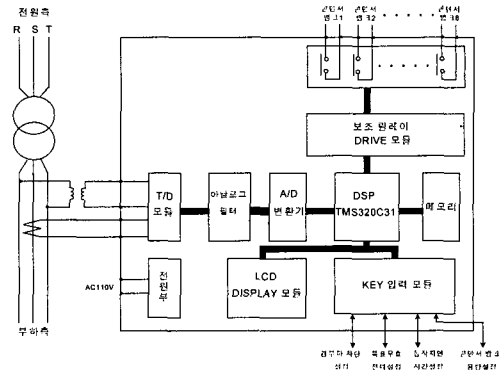


그림 4 역률제어기의 하드웨어 블럭도.
Fig. 4. Hardware block diagram of the power factor controller.

무효전력이 증가되어 콘덴서 뱅크의 투입치를 넘으면 설치되어진 콘덴서의 한 뱅크가 투입된다[6]. 만약 부하의 증가에 따라 계속해서 무효전력이 증가한다면 나머지 콘덴서 뱅크가 순차적으로 투입되어지며, 투입된 콘덴서 뱅크는 보상시킨 지상 무효전력량이라 볼 수 있다. 반대로 부하가 감소하여 진상 무효전력이 콘덴서 차단치를 넘어서는 경우 사이클릭 방식이나 우선순위 방식에 의해 투입된 콘덴서 뱅크가 차단된다.

III. 시제품 제작 및 실험 결과

본 연구에서는 전동기에서 발생할 수 있는 전기적 고장으로부터 부하를 안전하게 보호하기 위한 전동기용 보호계전기와 부하제어를 위한 역률제어기, 최대 수요전력 제어기가 구현되었다. 전력 계통의 전압, 전류를 입력받아 보호계전 모듈에 적용하기 위해서는 전압, 전류의 실효치를 계산하여야 한다. 이 때 입력신호는 직류 옴셋과 고조파가 포함된 정현파 신호로 표현되므로, 기본 주파수 성분의 실효치와 위상각을 얻기위하여 DFT를 이용한 디지털 필터링을 사용하였다. 이렇게 필터링되어진 기본과 성분만을 사용하여 동작되는 전동기용 보호계전 요소들의 동작시험을 시행하였으며, 보호계전기의 허용 오차가 $\pm 5\%$ 이하를 만족시키고 있음을 실험 결과로 알 수 있다. 또한 최대 수요전력제어기의 동작 결과를 원방에서 감시할 수 있도록 모니터링 시스템을 제작하였으며 제작되어진 시제품의 다양한 그래픽 화면을 제시하였다.

1. 전동기용 보호계전기의 동작시험
설계 및 제작되어진 전동기용 보호계전기의 알고리즘 및 성능을 검증하기 위하여 시험 규격에서 정하는 시험 조건에 따라 보호 요소별로 동작시험을 하였다.

1.1 단락 및 지락과전류 계전요소의 동작시험
전동기용 보호계전기의 단락전류 계전요소는 순시 특성을 요구하기 때문에 동작시간 오차보다는 정확한 동작, 부동작, 그리고 복귀의 여부가 시험 결과에 중요한 부분을 차지한다. 표 3에서는 순시 정정치를 20A로 설정하고, 입력전류를 40A를 인가하였을 경우 50ms 이하의 시간에서 정확히 계전기 동작이 이루어지고 있음을 보여 주고 있다.

표 3. 단락전류 계전요소의 동작시험.
Table 3. Operating test results of the OCR.

구분	동작치 정정	입력 전류	공칭 동작 시간	실측 동작시간		
				R	S	T
순시	최소 (20A)	200% (40A)	50ms 이하	26	27	25

지락과전류 계전요소는 순시 특성과 한시 특성을 모두 만족하여야 한다. 순시 특성인 경우는 단락보호용 계전요소와 동작 특성이 같으며, 단지 입력 전류가 상 전류가 아닌 중성선 전류라는 점만 다르다. 한시 특성 시험에서는 반한시, 강반한시, 초반한시 각 경우에 따라 동작 정정치의 200%, 700% 및 2000%의 입력 전류를 인가하고, 이때 동작시간의 허용오차는 공칭 동작시간의 $\pm 5\%$ 이내 범위를 만족하고 있음을 표 4에서 알 수 있다.

1.2 장시간 기동 계전요소의 동작시험

장시간 기동 계전요소의 시험 조건은 전동기 기동 및 정상운전 경우로 나누어야 한다. 전동기가 기동하는 경우에는 기동전류가 정격전류보다 크기 때문에 기동전류로 인한 계전기 오 동작을 막기 위하여 기동전류의 크기와 기동시간을 만족시키는 초반한시 특성에 따라 시험을 하고, 전동기 기동이 끝난 후 정상운전 시에는 정한시 특성을 적용하여 시험한다.

동작시간 정정은 최소로 설정하고, 동작 정정치를 정격전류의 200-400% 사이에서 설정한 상태에서 정한시 특성 시험에서는 정정치의 200%, 350% 및 500%의 입력전류를 인가하고, 초반한시 특성의 경우 기동전류 정정치에서 기동전류의 60%, 70%, 100% 및 150%를 인가한다.

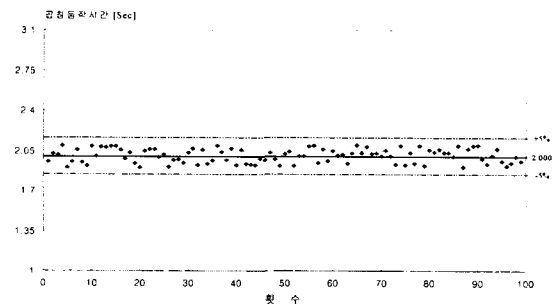
표 4. 지락과전류 계전요소의 동작시험.
Table 4. Operating test results of the OCGR.

구분	동작치 정정	동작 시간 정정	입력 전류 (%)	공칭 동작 시간	실측 동작 시간	오차 (%)
순시	10A		200	50ms	25ms	-
반한시	최소 (0.5A)	최소 (0.0)	200	0.750	0.747	-0.4
			700	0.288	0.285	-1.0
			2,000	0.200	0.197	-1.5
		최대 (10)	200	8.250	8.164	-1.0
			700	3.164	3.147	-0.5
			2,000	2.200	2.190	-0.5
강반한시	최소 (0.5A)	최소 (0.0)	200	2.500	2.457	-1.7
			700	0.477	0.470	-1.5
			2,000	0.200	0.193	-3.5
		최대 (10)	200	15.000	14.743	-1.7
			700	2.861	2.839	-0.8
			2,000	1.200	1.190	-0.8
초반한시	최소 (0.5A)	최소 (0.0)	200	3.125	3.172	1.5
			700	0.220	0.217	1.4
			2,000	0.050	0.049	-2.0
		최대 (10)	200	12.500	12.131	-3.0
			700	0.881	0.892	1.2
			2,000	0.200	0.198	-1.0

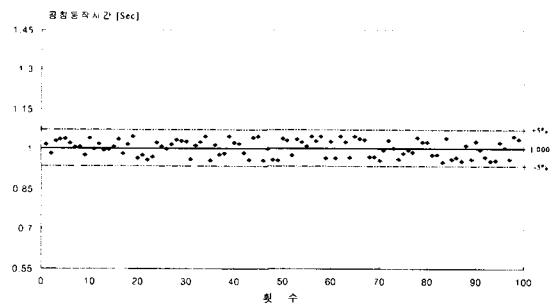
표 5. 장시간 기동 계전요소의 동작시험.
Table 5. Operating test results of the 51LR.

동작치 정정	열적상태	입력 전류 (%)	공칭 동작 시간	실측 동작시간			오차 (%)		
				R	S	T	R	S	T
정한시	최소	200	1.0	1.018	1.015	1.018	1.8	1.5	1.8
		350	1.0	1.017	1.017	1.016	1.7	1.7	1.6
		500	1.0	1.017	1.014	1.014	1.7	1.4	1.4
	최대	200	4.0	4.018	4.014	4.016	0.45	0.35	0.4
		350	4.0	4.016	4.018	4.017	0.4	0.45	0.43
		500	4.0	4.016	4.016	4.015	0.4	0.4	0.38

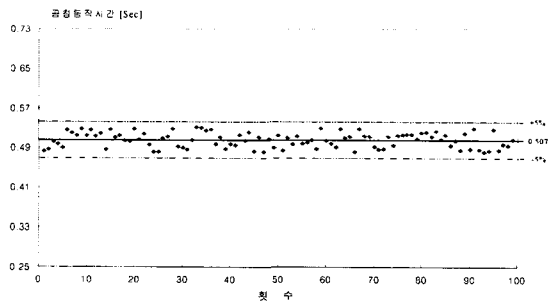
이 때에도 동작시간의 허용오차는 공칭 동작시간의 $\pm 5\%$ 이내 범위를 만족하고 있으며, 그림 5에서는 60% 및 150%인가 전류에서 100회 동작시험을 시행하여 얻은 결과를 공칭 동작시간을 기준으로 하여 나타내었다.



(a) 기동전류의 60%



(b) 기동전류의 100%



(c) 기동전류의 150%

그림 5. 51LR 초반한시 특성 오차.
Fig. 5. Extremely inverse characteristic error of the 51LR.

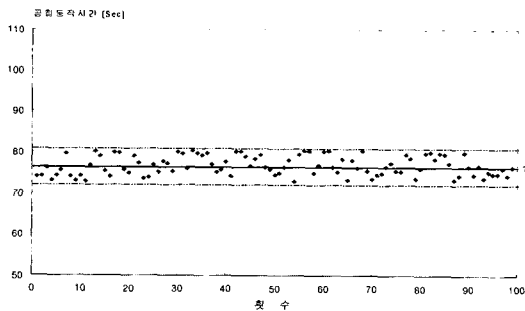
표 6. 열동과전류 계전요소의 동작시험.
Table 6. Operating test results of the THR.

열적 상태	입력 전류 (%)	공칭 동작 시간	실측 동작시간			오차 (%)		
			R	S	T	R	S	T
최소	150	76.53	74.23	74.86	75.24	-3.01	-2.18	-1.69
	200	36.98	37.08	37.22	36.57	0.27	0.65	-1.11
	600	3.59	3.59	3.59	3.59	0.08	0.03	-0.03
	800	2.00	2.01	2.01	2.01	0.10	0.10	0.25
중간	150	62.37	60.16	61.64	61.07	-3.54	-1.17	-2.08
	200	29.24	28.94	28.31	29.47	-1.03	-3.18	0.79
	600	2.75	2.76	2.76	2.77	0.33	0.22	0.47
	800	1.54	1.54	1.53	1.54	0.33	-0.33	0.26
최대	150	5.99	5.85	5.89	5.91	-2.45	-1.82	-1.33
	200	2.46	2.48	2.47	2.48	0.81	0.49	0.57
	600	0.21	0.21	0.21	0.21	-0.48	-0.48	0.0
	800	0.12	0.11	0.11	0.12	-2.59	-2.59	-0.86

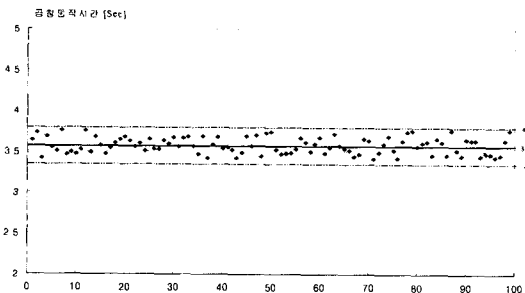
1.3 열동형 과전류 계전요소의 동작시험

대용량 정격을 갖는 전동기는 기동시 회전자의 온도 상승이 문제가 되며, 이러한 이유로 허용되는 기동시간을 제한한다. 짧은 냉각시간과 반복된 기동으로 인해 열적 에너지가 축적되고 회전자 및 고정자 온도가 각 기동시 마다 단계적으로 상승하게 되므로, 열적 상태에 따른 전동기의 특성은 매우 중요하다.

정격전류를 2A, 열시정수(τ)를 2분으로 설정하여 열동형 과전류 계전요소를 특성 시험하였다. 최소 동작치



(a) 정격전류의 150%



(b) 정격전류의 800%

그림 6. 열적상태가 최소일 때 열동형 계전요소의 동작 시간 오차 ($\tau=2\text{min}$).

Fig. 6. Operation time error of the THR (thermal state is min. value).

표 7. 역상전류 계전요소의 동작시간 오차.
Table 7. Operation time error of the NSR.

구분	동작치 정정	동작 시간 정정	입력 전류 (%)	공칭 동작 시간	실측 동작 시간	오차 [%]
정한시	최소		200	0.1	0.101	1
			700	0.1	0.099	-1
			2000	0.1	0.099	-1
	최대		200	10.0	9.997	-0.03
			700	10.0	9.995	-0.05
			2000	10.0	9.987	-0.13

및 동작시간 정정치에서 열적 상태 파라메타는 다시 최소($\theta=0\%$), 중간($\theta=50\%$), 최대($\theta=100\%$)로 나누어 각각에 대해 시험하였다.

정격전류의 150%, 200%, 600% 및 800%를 인가하였으며, 이때 동작시간의 허용 오차는 공칭 동작시간의 $\pm 5\%$ 이내 범위를 만족하고 있음을 표 6에서 알 수 있다. 그림 6에서는 열적상태가 최소일 때, 50%, 600% 및 800% 정격전류에서 100회 동작시험을 시행하여 얻은 결과를 나타내었다.

1.4 역상전류 계전요소의 동작시험

역상전류 계전요소의 시험 조건은 정격전류를 5A로 설정한 상태에서 동작치 정정은 최소(0.5A)로 놓고, 동작 시간 정정은 동작시간 특성이 정한시이므로 최소(0.1초)일 때와 최대(10초)일 때로 나누어 실험하였다. 인가전류는 동작 정정치의 200%, 700%, 2000% 전류를 인가하였다.

2. 최대 수요전력제어기의 시제품 제작

최대 수요전력제어기는 피크 전력값이 설정된 목표 전력값을 초과하거나 또는 이러한 상황이 예측되는 경우 운전자에게 미리 목표전력의 초과 상태를 알리기 위해 제어기에 부착된 부저를 이용하여 경보를 발생하며, 차단방식에 따라 부하를 선택 차단한다. 이 때 부하차단 방식은 사이클릭 방식이나 우선순위 방식 또는 조합한 방식을 사용하며, 차단 상태도 경보와 마찬가지로 모니터 화면에 표시되어지며 동시에 이벤트 발생 보고서에 기록되어 진다.

수·변전 설비에 설치되어진 최대 수요전력제어기를 이용하여 개인용 컴퓨터를 본체로 사용하는 전력제어시스템을 구성할 수 있다. 즉 최대 수요전력제어기와 직렬 통신을 통해 부하 제어시 필요한 데이터를 하드 디스크에 파일 형태로 저장하고 그래픽을 통하여 운전자가 손쉽게 부하 상태를 감시할 수 있도록 화면을 구성할 수 있다.

제작되어진 전력제어 시스템은 15분 전력제어 화면(그림 7), 일별 경향화면(그림 8), 사용전력 표시 화면 및 변수설정 화면 등 다양한 디스플레이를 제공하며 부하의 제어, 화면 종류의 선택 및 보고서 출력 등의 모든 시스템 기능이 손쉽게 운영되도록 구현되어졌다.

모든 제어용 화면에서는 현재의 날짜와 시간표시, 총 적산전력량 표시, 현재의 부하 차단 표시, 경보 상태 표

시 및 다양한 그래프 화면을 열기 위한 아이콘이 항상 표시되고 있다. 특히 그림 7과 같은 15분 전력제어 화면에서는 디맨드 시한과 사용 전력량을 그래프 형태로 보여주고 있으며, 주간/저녁/심야 시간별로 사용 전력값을 구분하여 표시하고 있다.

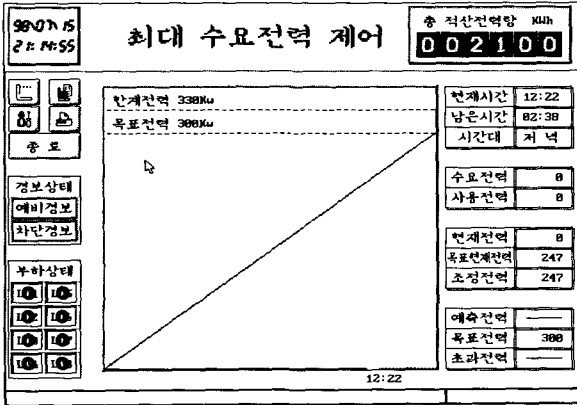


그림 7. 15분 전력제어 화면.
Fig. 7. 15 min. demand control display.

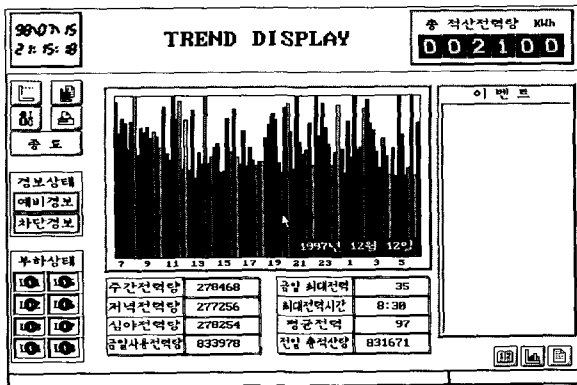


그림 8. 일별 경향화면.
Fig. 8. Daily trend display.

IV. 결론

본 연구에서는 기존의 전동기제어반을 대체하며, 역률 및 목표전력을 제어하는 고 기능의 디지털형 전동기제어반을 설계하는 데 목적이 있다. 전동기제어반의 가장 중요한 기능이라 할 수 있는 전동기용 보호계전기에서는 열동 과부하 계전요소 및 결상사고, 회전자구속 사고를 검출하는 보호요소들을 설계, 제작하였으며, 그리고 보호 계전요소 외에 부하를 제어하는 역률제어, 최대 수요전력제어 기능을 추가하였다. 계전요소의 동작특성을 정의 하였으며, 각 보호 요소별로 수행한 동작시험 결과는 허용오차 ±5% 이내의 정확도를 갖고 있음을 보여주고 있다. 또한 디지털 전동기제어반에 기존의 아날로그형에서 구현하지 못했던 통신기능을 추가함으로써, 별도의 단말

장치 없이 전력 감시제어시스템을 구축할 수 있었으며, 연구 수행을 통해 얻은 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 개발되어진 전동기용 디지털 보호계전기를 시험 기준에 의거하여 형식시험을 수행한 결과, 모든 보호 계전 요소가 동작시간의 허용오차 ±5% 이내에서 동작함으로써 우수한 성능을 입증하였다.

2) 특히 DSP를 사용하여 제어기의 하드웨어를 제작하였으며, 고속 연산을 수행함으로써 실시간 처리가 가능하였다. 특히 다중 태스크를 스케줄링함으로써 태스크의 시제한(데드라인)인 1.38ms 이내에 모든 계전 알고리즘을 처리할 수 있었다.

3) 전동기 보호기능 외에 하절기의 피크전력을 제어하는 최대 수요전력제어기와 무효전력 증가에 따라 역률을 개선하는 역률제어기를 개발하여 부하제어에 적용하였다. 이처럼 전동기용 보호계전기, 최대 수요전력제어기 및 역률제어기로 구성되어진 다기능의 전동기제어반을 설계·구현하였으며, 통신 제어장치를 통해 상위시스템과 연결함으로써 별도의 원격단말장치를 사용하지 않고서도 전력감시제어 시스템을 구축할 수 있었다. 향후 전동기용 보호계전기가 트립하였을 때 고장 데이터를 온라인으로 저장하고 또한 실시간으로 분석하여 전동기의 사고 종류를 진단하는 지능형 시스템의 연구가 계속 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] R. J. Brighton and P. N. Ranade, "Why overload relays do not always protect motors", *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. IA-18, no 6, pp. 691-697, 1982.
- [2] J. Brethauer and N. Struck, "Starting of large medium voltage motors : Design, protection, and safety aspects", *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 31, no. 5, pp. 1167-1176, 1995.
- [3] S. F. Farag, R. G. Bartheld, and W. E. May, "Electrically enhanced low voltage motor protection and control", *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 30, no. 3, pp. 776-783, 1994.
- [4] D. J. Gausshell and H. T. Darlington, "Supervisory control and data acquisition", *Proc. of the IEEE*, vol. 75, no. 12, pp. 1645-1658, 1987.
- [5] D. Baigent and E. Lebenhaft, "Microprocessor-based protection relays : design and application examples", *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 29, no. 1, pp. 66-71, 1993.
- [6] 우천희, 우광방, "디지털 필터링을 이용한 무효전력 제어에 관한 연구," 제어자동화시스템공학회 논문지, pp. 517-524, vol. 4, no. 4, Aug., 1998.



우 천 희

1961년 6월 5일생. 1985년 연세대 전기과 졸업. 동대학원 석사(1993). 동대학 박사과정 수료(1995-현재). 1985-1995 현대중공업 중앙연구소 선임연구원. 1995-현재 명지전문대학 전기과 조교수. 관심분야는 디지털

형 전동기제어시스템, 디지털 보호계전기, 실시간 제어, 마이크로프로세서 응용.

강 신 준

제어·자동화·시스템공학 논문지 제4권, 제4호, 참조.

이 덕 규

제어·자동화·시스템공학 논문지 제4권, 제4호, 참조.

구 영 모

제어·자동화·시스템공학 논문지 제4권, 제4호, 참조.

김 학 배

제어·자동화·시스템공학 논문지 제4권, 제1호, 참조.

이 성 환

제어·자동화·시스템공학 논문지 제4권, 제4호 참조.