

전력감시 제어 시스템을 위한 모터보호용 디지털 보호계전기 개발

A Development of Digital Motor Protection Relay for Power Supervisory Control System

*이성환**, 우천희*, 강신준*, 정현호*, 우광방*, 김정환**, 김상철**

*연세대학교 전기공학과 (Tel: 361-2767; Fax: 312-7735; E-mail: shi@auto.yonsei.ac.kr)

**현대중공업(주) 마북리연구소 시스템제어연구실(Tel: (0331)289-5118; Fax: (0331) 283-8365)

Abstracts Recently the major requirements have emerged in industrial substation system field. One is the simple arrangement of main power supply equipment and the other is the introduction of highly computer-controlled systems for operation, maintenance and protection. This paper deals with the systems including motor-type relay systems, supervisory and control systems, digital type relay protection systems.

Keywords induction motor, motor protection relay, digital relay, supervisory and control system

1. 서론

수용가 전력제통이 복잡화, 대형화되면서 부하제통이 점차 복잡해지고 그에 따른 전력 설비 운용의 신뢰성이 점차 중요해짐에 따라 3상 전동기를 보다 신속하고 신뢰성있게 운전하며 이들을 보호하는 모터보호 계전기 및 이를 이용한 원격감시제어 시스템이 크게 부족한 형편에서 현장 유지보수의 편의성을 통한 인력 절감의 효과가 일반 수용가에서는 더욱중요해짐에 따라 보다 고도화되고 자동화된 디지털 타입의 모터 보호계전기가 절실히 요구된다. 또한 중앙감시실에서 현장 조작반의 디지털 모터 보호계전기들을 통합관리 감시하는 새로운 HOST SYSTEM을 구축함으로써 이를 통해 모터사고 검출의 다양화 및 신속화, 중대된 감시 제어 항목의 처리, 보수 점검의 합리화, 모터설비의 고신뢰도 운전 등이 가능케 될 것이다.

본 연구에서는 기존의 방법과는 달리 중소규모 플랜트 및 대규모 플랜트에까지 적용가능한 전력감시제어 시스템에 적용할 수 있는 모터보호용 디지털 계전기를 설계한다. 디지털 계전기를 설계함에 있어 보다 빠르고 정확한 계전기능과 계측기능을 수행할 수 있도록 TMS320C31이라는 DSP CPU를 탑재하였다. 디지털 계전기의 성능을 인증하기 위하여 전기협동조합에서 제시한 시험규격에 따라 실제로 시행한 시험결과를 제시하고 계전기를 통해 수집된 입력 전류를 통해 모터 부하의 상태를 모니터링하고 모니터링된 입력파형을 인공지능 기법을 이용하여 분석함으로써 모터의 고장 검출과 진단에 전문가의 지식에 의존을 하지 않는 지능형 전력감시제어 시스템을 설계함으로써 모터사고와 나아가서는 계통전체의 안정화된 운전에 있어 그 타당성을 보이 고자 한다.

2. 모터보호용 디지털 계전기를 이용한 전력감시 제어 시스템

전력설비/각종기기의 상황 및 제어, DATA을 위한 현장용 중앙 감시 시스템으로서 디지털 단말 유니트들과 통신으로 연결됨으

로써 종합적인 보호/제어/감시가 가능하며 다양한 메뉴화면의 운용 및 데이터 관리를 통해 현장에서 최적의 전력설비 운전을 지원하는 시스템이다. 디지털 계전기, 전자식 배전반 등과 같이 디지털화 및 지능화되어 있는 유니트들로 구성되어 있고, 전력설비의 보호기능을 수행한다.

2.1 전력감시제어 시스템의 전체 구성 및 기능

전력감시제어 시스템의 전체적인 구성은 그림 1과 같다. 크게 단말 유니트인 디지털 계전기, 상위 HOST 시스템인 중앙 감시부, 그리고 하위 단말 유니트와 상위 HOST 시스템을 연결해주는 통신제어장치로 구성되어 있다. 단말 유니트의 전력요소별 처리 장치가 T/D (Transducer), 전기기기계속 계전기 등의 장치들이 디지털 계전기, 전자식 배전반등과 같이 디지털화, 지능화 되어 있고, 이들 단말 유니트들은 표준 통신방식(RS485)을 이용하여 전력감시제어 시스템이 자체적으로 데이터 관리가 이루어지고, MMI(MAN MACHINE INTERFACE) 기능을 가지고 있으므로 각종 데이터의 입/출력 상황과 단말기 유니트의 사고 상태를 확인할 수 있다. 또한 실시간으로 데이터의 저장이 이루어지고 수집된 데이터는 ETHERNET(TCP/IP) 통신으로 실시간 전송 처리가 이루어지고 있다. HOST 시스템의 구성을 보면 Windows NT OS를 탑재한 상용화 되어있는 산업용 HOST 시스템으로 데이터 관리 및 MMI 기능을 가지고 있고 단말 유니트로 부터 발생된 데이터를 프린트 장치 및 그래픽 패널에 표시되도록 구성되어 있다.

2.2 중앙 감시부의 감시 및 제어기능

전체 디지털 계전기를 감시·제어할 수 있도록 GRAPHIC화된 풍부한 화면이 준비되어 있으며, 최소한 다음과 같은 감시 및 제어 화면이 있고, 전 화면의 표시 응답시간은 1초 이내로 동작 한다.

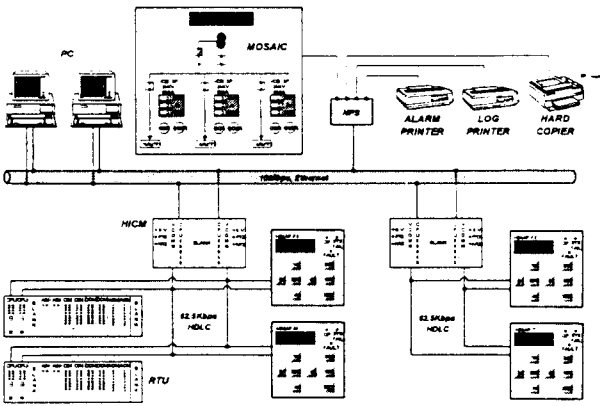


그림 1. 전력감시제어 시스템의 전체 구성도

1) 계전기 로그 화면

사고분석을 위해 사고발생 일시, 계전기 종류, 위상, Ratio 및 동작시간을 표시하고, Button을 통해 특성곡선을 참조할 수 있도록 하였다.

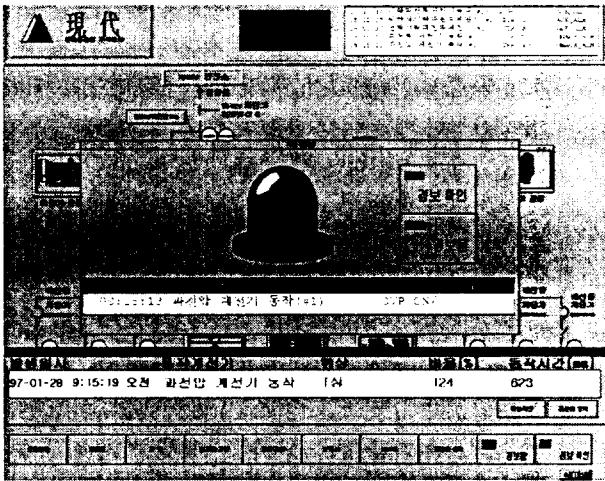


그림 2. 계전기 로그 화면

2) 계전기 특성곡선

운전자로 하여금 각 계전기에서 사용하는 특성곡선의 setting 치와 동작치의 비교, 분석을 용이하게 하기 위한 기능이다.

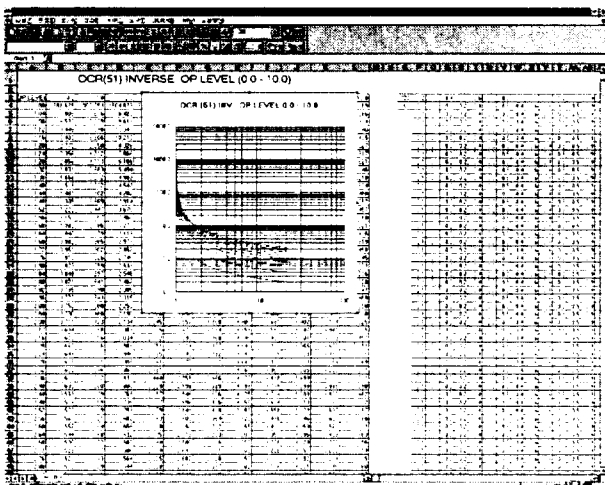


그림 3. 계전기 특성곡선

3) 계통도 화면

Plant 및 System을 Graphic으로 표시하며, 이에 의한 감시

및 운전조작을 하는 화면으로서, Graphic 소프트웨어 전용 package(Graphic Editor를 사용하여 사용자도 손쉽게 수정할 수 있다. Graphic 화면상에서 각 point에 대한 detail 화면을 통하여 직접 운전 조정이 가능하고 multi-window 기능을 이용하여 다수의 상태 조정을 연속적으로 실시할 수 있다. 중요도가 높은 Graphic 화면의 one-touch 호출을 하기 위한 user hot key가 준비되어 있다. 플랜트 및 시스템을 온라인으로 표시하기 위한 기능으로써 비트맵 버튼을 통하여 자세한 화면으로 이동할 수 있다.

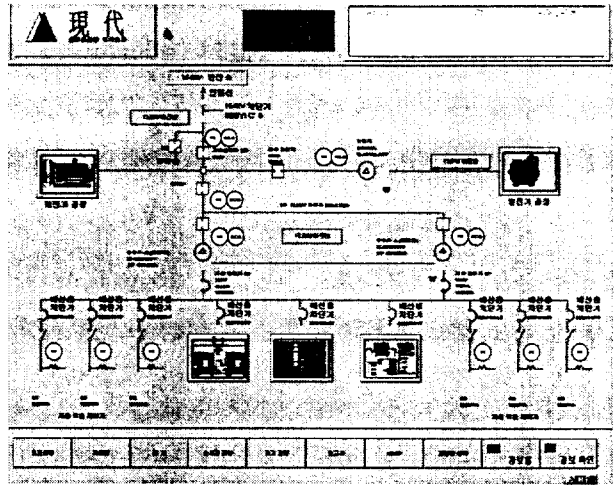


그림 4. 계통도 화면

4) 과거경향 화면

Trend Chart상 원하는 point의 데이터 추이를 표시, sample 주기, trend 기록시간, 증축 확대율등을 사용자가 마음대로 수정 가능 하도록 구성.

- 화면당 4개의 Tag 표시 (4개의 Pen)
- Sampling Time/Chart Time Span 지정 가능
- Zoom in/out에 의한 Range 조정 가능
- Trend화면상에서 double click하여 Control Panel에서 조작
- Min/Max, AVG/Scatter, AVG/Barchart의 3가지 Display Mode

- Chart Length, Chart Range, Trend될 Tag(Pen), Chart 시점 지정

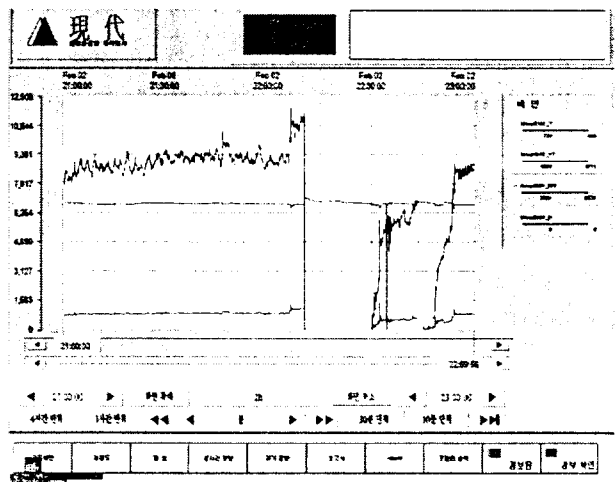


그림 5. 과거경향 화면

실제 지락사고 데이터를 나타내고 있다.

3. 모터 보호용 디지털 계전기

3.1 디지털 모터 보호 계전기 알고리즘

(1) Motor Thermal Model

모터는 heat source를 포함하고 있다고 가정할 수 있다. 열적 이동이 평형을 이룰 때 모터의 온도는 정상상태 값에 도달하게 된다. 모터의 열적 근원은 고정자 권선과 회전자의 squirrel-cage bar이다. 모터의 공극과 철재부근을 통해 공기흐름에 의해 열을 식힐 수 있다. 열적 평형 온도보다 모터의 온도가 높을 때 이를 수식으로 표현하면 식(1)과 같다.

$$\frac{T - T_{ambient}}{T_{initial} - T_{ambient}} = e^{-(t/\tau)} \quad (1)$$

여기에서,

T : 현재온도

$T_{initial}$: 모터의 초기 온도

$T_{ambient}$: 공기냉각시의 주위온도

t : 시간 τ : 열시정수

위의 식 (1)을 다른 형태로 나타내면 식 (2)와 같다.

$$T = T_{ambient} + [(T_{initial} - T_{ambient}) e^{-(t/\tau)}] \quad (2)$$

실제로 모터의 온도는 과전류가 흐를 때 급속히 증가하고 특히 시동시에 과전류가 흐르게 되면 더 급속히 증가하게 된다. 모터 시동시에 열의 대부분은 회전자의 저항에 의해 발생되는데 거의 350℃정도 증가해서 팽창과 변형으로 인한 회전자의 손상을 가져온다. 모터 운전시에는 모터의 열이 고정자 권선에 집중되고 권선의 온도가 절연 시스템 단열률을 초과하게 되어서 단열 파괴가 일어나 권선에서 전기적 고장이 발생하게 된다. 모터 운전시의 과부하가 고정자에 의한 원인만 있는 것이 아니다. 전류의 불평형과 역상 과전류가 회전자에 흐르게 되면 열적 상승의 원인이되고 모터에 빠른 손상을 입히게 된다. 열이 발생한 곳에 상관없이 그 속도로 인해서 모터는 등가 고정자 전류로부터 에너지를 흡수하는 단열 시스템이라고 가정할 수 있으나 열을 발산하지는 않는다는 가정하에서는 모터의 온도가 에너지를 흡수함에 따라 증가하게 된다.

$$\int q dt = R \int i_{ca}^2 dt = cwT \quad (3)$$

여기서

u : 모터 권선의 무게

c : 모터 권선 열

T : 권선의 온도

R : 권선의 전기저항

i_{ca} : 역상전류를 위해 조정된 고정자 전류

q : 열 흐름

식 (3)을 온도에 관해 다시 쓰면 식 (4)과 같다.

$$T = \frac{R}{cw} \int i_{ca}^2 dt \quad (4)$$

모터 손상은 과부하 전류와 손상시간 k와 밀접한 관련이 있다. 모터의 작용을 안다고 할 때 모터 손상 곡선이 I^2t 와 관련이 있다고 가정할 수 있다. 그러므로 주기적 시변정수를 이용해서 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$i_{ca}^2 k \approx Constant \quad (5)$$

$$i_{ca}^2 \approx \frac{Constant}{k} \quad (6)$$

식(4)의 I^2 을 바꾸면 과부하 상태와 관련된 모터 온도를 식(7)과 같이 표현할 수 있다.

$$T = C \int \frac{1}{k} dt \quad (7)$$

여기에서 C는 다수의 다른 상수를 포함하는 상수값이다. 만약 전류가 Δt 의 간격을 가지고 주기적으로 샘플링된다면 모터에 손상을 주는데 걸리는 시간은 반복적인 방법으로 계산될 수 있다.

$$i^{(n+1)} = i^{(n)} + \frac{\Delta t}{k^{(n)}} \quad (8)$$

(2) 열동형계전기(THR)

알고리즘

열동형계전기의 동작특성은 모터의 상태에 의존하므로 우선 전류입력으로부터 정지상태인지 정상운전상태인지 확인한다. 상태확인 후 입력전류(RmsValue)와 열동형계전기 동작전류(Thermal_Inverse_Setting)의 비(Ratio)의 값으로부터 현재 전류 입력이 모터에 열적과피를 일으킬 수 있는가를 확인한다. 전류 입력이 동작전류보다 큰 경우, 열적과피의 가능성이 있으므로 현재 전류입력에서 견딜 수 있는 시간을 모터의 상태에 따라 위의 COLD CURVE와 HOT CURVE중 하나로부터 구하여, 전류 입력이 동작전류를 초과하기 시작한 시각부터 경과한 시간과 비교한 후, 경과시간이 동작시간을 초과하면 부하차단을 명령한다.

(3) 역상 과전류계전기(NSR)

알고리즘

삼상 전류입력으로부터 역상전류를 검출하는 방법은 다음과 같다.

각 상 전류를 I_A, I_B, I_C 라할 때, 역상전류 I_N 은 식 (9)로 나타낼 수 있다.

$$I_N = \frac{1}{3}(I_A + a^2 I_B + a I_C) \quad (9)$$

여기서 $a = 1 \angle 120^\circ$

삼상 아날로그 신호에서 역상전류, I_N 을 구하기위한 방법은 IC를 120° , IB를 240° 만큼 회전(phase shift)시켜 이를 IA와 더하는 것이 보통이다. 샘플링에 의한 디지털 신호를 이용하여 역상전류, I_N 을 구하기위해선 IA의 샘플에 120° 후에 취해진 IB의 샘플, 240° 후에 취해진 IC의 샘플을 더하여 IA의 샘플 시점에서의 역상전류(3IN)를 구하는 것이다.

삼상회로의 결상운전 또는 불평형운전을 검출하기위한 방법으로 역상전류(Negative_Rms)와 더불어 삼상 전류입력의 최대값과 최저값의 차(max_cur - min_cur)를 이용하였다. 역상전류 또는 전류입력차가 동작전류(Current_Setting)보다 큰 경우, 정한시 동작특성에 따라 일정시간을 기다린 후, 동작시간이 경과하면 부하차단 명령을 보낸다. 동작시간이 경과하기전에 역상전류 또는 전류입력차가 동작전류의 95%이하로 낮아지면, 이미 고장상태(TRIP)인 경우 부하 복귀를 명령하고, 대기상태(WAIT)인 경우 고장발생 시각으로부터의 경과시간 계산을 초기화한다.

(4) 과부하 보호용 과전류 계전기(51LR)

알고리즘

모터의 과부하에 의한 과전류를 검출하여 회로를 차단, 모터를 보호하는데 사용하는 과부하 보호용 과전류 계전기에 대하여 적용한다. 모터의 대표적인 과부하 상태인 회전자 구속상태를 보호하는 회전자구속 보호요소와 기동시의 과전류(기동전류)를 검출하여 모터를 보호하는 시동전류 보호요소로 구성되었다.

회전자 구속보호는 열적동작 특성을 가지므로 충분한 시간 간격 후에 작동하게 된다. 이러한 이유로 과전류 요소와 설정된 시동시간(tstart)가 지난 후에 작동하게되는 시간지연 요소를 가지게 된다. 보통 동작전류는 정격전류(Ib)의 1~4배 사이에 맞추어지게 되고 시간지연은 1~60초 사이에서 설정될 수 있다. 전류와 시간은 기계적인 부하의 변화와 단락회로로 인한 오동작을 피하기 위해 충분히 크게 설정되어야 한다. 시동전류 보호요소의 동작 특성은 초반한시 특성을 따르며 초반한시 동작시간은 지락과 전류 계전기(Ocgr)에서와 동일한 방법의 의하여 얻는다.

전류입력이 동작전류(51LR_Current_Setting)보다 큰 경우 우선 고장발생으로부터의 경과시간이 기동시간(t_start)을 초과하였는지 확인한다. 초과한 경우, 시동전류 보호요소를 고려하지 않아

도 되며 추가로 회전자속 보호요소의 정한시 동작시간이 경과하였는가를 확인한다. 정한시 동작시간을 경과하였으면 부하차단을 명령한다. 만일 초과하지 않은 경우, 전류입력에 해당하는 초반한시 특성 동작시간과 경과시간을 비교하여 동작시간을 초과하는 경우, 부하차단을 명령한다. 회전자속 보호요소, 시동전류 보호요소 모두 전류입력이 동작전류의 95%이하로 낮아지면 고장상태(TRIP)인 경우 부하복귀를 명령한다.

(5) 단속계전기(NCHR)

알고리즘

시동횟수의 제한은 시동허용시간, 시동제한횟수, 시동제한시간에 의해 결정된다. 즉, 시동허용시간내에 시동제한횟수만큼의 부하차단이 일어나지 전까지는, 부하차단후 부하 복귀명령에 의해 차단된 부하가 복귀될 수 있으나, 시동허용시간내에 시동제한횟수만큼의 부하차단이 일어나면, 일단 차단된 부하는 시동제한시간동안 복귀될 수 없으므로 재시동이 불가능하게된다.

앞서 언급했던 단속계전기를 제외한 계전기 모듈들이 행하는 부하차단과 부하복귀 명령에 대한 직접적인 실행여부는 단속계전기의 상태에 의해 결정된다.

단속 계전기는 부하차단이 발생될 때마다 부하가 차단된 시간이 기억되며, 기억된 차단기록중에서 현재 부하차단 시점으로부터 과거 시동허용시간동안 발생한 차단횟수를 알아내어, 시동제한횟수와 같은가를 확인한다. 차단횟수가 시동제한횟수와 같아지는 경우, 차단된 부하에 대한 더이상의 복귀는 시동제한시간동안 불가능하다(Trip_Release_Disable). 시동제한시간이 경과한 후엔, 차단된 부하를 복귀시키고 차단이 발생할 때마다 위의 과정을 반복한다.

(6) 저전류계전기(UCR)

알고리즘

저전류계전기는 순시동작특성을 가지며, 각 상전류중 가장 작은 전류값과 저전류계전기 순시동작 전류값과 비교하여, 입력전류가 순시동작 전류값보다 작은 경우, 무부하 상태로 판단하고 부하차단을 명령한다.

4. 모의 실험 및 결과 고찰

4.2 모터 보호용 디지털 보호계전기 기능 시험

(1) 기능 시험 환경

제작되어진 모터 보호용 디지털 계전기의 알고리즘 및 하드웨어의 성능을 검증하기 위하여 실제 시험에서는 3상 전류·전압값이 필요하므로 그림 6과 같이 릴레이 시험장비(FREJA RTS21D)를 사용하였다.

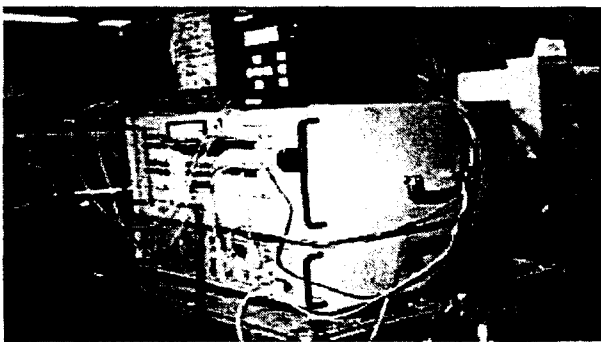


그림 6. 성능 시험을 위한 시험장치의 사진

(2) 기능 시험 결과

모터 보호용 디지털 계전기의 알고리즘 및 하드웨어를 검증하기 위해서 한국전기협동조합에서 1996년 6월 26일자로 개정된 한국전기공업협동조합규격인 KEMC 1120에서 정하는 실험조건과 기준에 따라 실험하였다.

5. 결론

본 논문에서는 전력계통에서 다양한 부하 환경과 용량을 가지는 유도전동기의 운전 도중 발생하는 고장을 적시에 발견하고,

고장의 원인을 진단하여 계통을 보호하기위하여 모터보호용 디지털 계전기를 이용한 전력감시제어 시스템을 설계하였다. 모터보호용 디지털 계전기는 기존의 아날로그 계전기에서 구현하지 못했던 통신기능이 추가됨으로써 별도의 RTU(Remote Terminal Unit)없이 전력감시제어 시스템에 연결할 수 있게 되었다. 그리고 DSP CPU를 탑재함으로써 실시간 계산을 가능하게 함으로써 신속하고 정확한 계전기능을 구현할 수 있었다. 그리고, 모터보호용 디지털계전기 알고리즘을 한국전기협동조합에서 제정한 KEMC1120에 의거하여 실험조건과 기준에 따라 실험을 수행함으로써 그 타당성을 검증할 수 있었다.

참고문헌

[1] Sam F. Farag, M.K. Jhaveri, "Intelligent Microprocessor-Based Devices Provide Advanced Motor Protection, Flexible Control, and Communication in Paper Mills", IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 33, No 3, May/June, 1997.
 [2] Lance G. Grainger, Michael C. McDonald, "Increasing Refiner Protection by Using Motor Thermal Capacity for Protection and Control", IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 33, No 3, May/June, 1997.
 [3] Drew Baigent and Ed Lebenhaft, "Microprocessor-Based Protection Relays: Design And Application Examples", IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 29, No 1, January/February, 1993.
 [4] Sam F. Farag, Robert G. Bartheld, and William E. May, "Electrically Enhanced Low Voltage Motor Protection and Control", IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 30, No. 3, May/June, 1994.