

고효율 전동기와 순시형 MCCB의 적용

이한석 부장
김동완 대리

한국전력(주) 차세대 원자로 전기설계

1. 개요

에너지 절약 운동의 일환으로 미국은 1997년 10월 24일 이후부터 Design B 전동기에 대해 고효율화 제작을 의무화하고 1999년에 개정된 National Electric Code에는 고효율 전동기에 대한 보호장치 정정 지침을 제시하는 등 관련 법규와 지침들에 대한 제정 및 개정 작업을 발빠르게 진행하고 있다. 우리 나라도 OECD 가입을 계기로 선진국 대열에 진입하게 되었으며 전세계 녹색에너지가족 운동의 일환으로 1995년도부터 전력소비량의 약 60%를 차지하고 있는 전동기의 고효율화를 녹색모터(Green Motors) 운동을 통해 추진하고 있다. 이러한 움직임에 맞추어 한국전력도 발전소 설계시 50hp 이하의 전동기에 대해서 고효율 전동기를 적용하여 설계할 것을 권장하고 있다.

저압 전동기 제어반(MCC : Motor Control Center)은 순시형 MCCB(Molded Case Circuit Breaker)와 Magnetic Contactor, 과부하 계전기, 지락 계전기 등으로 구성된 Combination Motor Controller 또는 Starter에 의해 단락, 과전류 및 지락 사고로부터 전동기를 보호하고 운전할 수 있도록 되어 있다. 최근 해외에서는 고효율 전동기와 같이 구동토크가 큰 전동기 기동시 MCC가 트립되거나 소손되는 사례와 이에 대한 해결방안이 제시되고 있으며, 국내의 경우 발전소설비, 정유설비 등 다수의 전동기 부하가 운전되는 산업설비에 대해 고효율 전동기의 적용이 보다 확대되어감에 따라 기존의 MCC로부터의 트러블도 증가할 것으로 예상된다. 이 검토에서는 고효율 전동기의 사용이 보다 적극적으로 확대되어 가는 저압 MCC 계통에서의 순시형 MCCB 정정과 보호협조 및 기타 쟁점사항 등을 소개하고자 한다.

2. 고효율 전동기

고효율 전동기라 함은 표준형 전동기보다 손실을 20~30% 정도 감소시켜 효율을 5~6% 이상 향상시킨 전동기를 말한다. 고효율 전동기는 전동기의 손실 요인인 고정자/회전자 동손, 철손, 표류부하손 및 기계손이 최소화되도록 설계하여 효율을 증가시켰으며, 특징으로는 회전자 저항의 감소로 고정자 전류가 증가되어 기동토크 및 가속성을 개선할 수 있으나, 이로 인해 높은 Inrush Current를 갖게 된다. 하지만 기동토크의 증가와 높은 Inrush Current는 고정자 권선의 온도상승 요인으로 작용하여 결국 허용 Stall Time이 짧아지게 된다. 또한 전동기 저항을 낮춤으로 인해 전동기 X/R 비가 커져 고장점의 First Cycle 단락 침투 전류값에 영향을 미치게 되는데 전동기 기동시 First Cycle에서의 과대전류는 단락사고시와 유사하므로 비대칭 기동전류가 증가할 것으로 본다.

현재 개발되고 있는 고효율 전동기는 범용으로 사용되고 있는 NEMA Design B 전동기의 효율을 개선한 것으로서 NEMA MG 1에서 Energy Efficient 전동기로 정의하고 있는 Design E 전동기와는 전기적 정격이 다를 것으로 생각되나, NEMA MG1-1993(Rev.4) 12.35.1항과 12.35.2항에서 보여 주듯이 기동시의 가속회전자전류에 있어 Design E 전동기가 Design B 전동기보다 상당히 큰 것으로 미루어 Design B 고효율 전동기의 경우도 Design B 표준전동기보다 기동전류가 증가할 것으로 본다. 실제로 국내 전동기 제작사가 제시하고 있는 전동기 설계데이터에 따르면 고효율 전동기의 효율은 88%~96%로서 표준전동기효율 83%~88%보다 6%~8% 정도 개선되어 있다. 반면에 기동전류는 전부하전류의 580%~750%에 달해 표준전동기의 530%~600%보다 상당히 높은 기동전류가 요구되고 있다. 표 1은 미국의 전동기 제작사인 Reliance Electric의 460V Design B 고효율 전동기와 표준전

동기의 특성을 참고로 비교하여 보았다.

〈표 1〉 표준전동기와 고효율 전동기 특성 비교

HP	효율(%)		전부하전류(A)		구속전류(A)		기동 토크(lb-ft)	
	표준	고효율	표준	고효율	표준	고효율	표준	고효율
15	86.7	93	20	18	112	116	78.4	100
20	88	93.1	25.2	23.8	138	145	102	128
30	89.3	93.6	37	36.1	205	217	168	185
40	89.4	94.2	51	48.3	255	290	197	220
50	90.6	94.5	62	59.6	340	358	265	275
60	90.2	95	72.4	68	405	430	283	320
75	91.7	95	89	85.1	534	540	379	408
100	91.2	95.4	118	111	661	715	437	438

주) 미국 Reliance Electric사 전동기, 460V 3상 60Hz, TEFC 4극

3. MCCB의 적용

가. MCC 구성기기 선정

600V 이하의 저압 MCC는 통상 100kW 이하의 소형 부하에 전력을 공급하고 있으며 MCCB, Contactor, 과부하 계전기 및 지락 계전기 등을 적절히 조합하여 제어회로를 구성하고 있다. 구성 기기들 중 MCCB는 한시 및 순시트립 특성을 갖는 Thermal Magnetic Type과 순시트립 특성만을 갖는 Magnetic Only Type이 있으며 부하의 운전모드와 조합회로의 기기비용 등을 감안하여 Thermal Magnetic Type은 변압기, 전열기 및 전등/Receptacle 배전반 등 정지부하 회로에, Magnetic Only Type은 전자접촉기 등과 조합하여 전동기 부하회로에 사용하고 있다.

(1) 순시형 MCCB

순시형 MCCB는 차단기의 Thermal Magnetic 요소 중에서 Thermal Sensing Element가 제거된 차단기로서 한시트립 차단기와 마찬가지로 트립전류 폭을 갖고 있으며 전자접촉기, 과부하 계전기, 지락 계전기

와 결합하여 전동기회로의 과부하, 단락 및 지락에 대해 완전한 보호기능을 갖는다.

- 차단기 연속전류정격은 NEC 430-110(a)에 따라 전동기 FLC의 115% 이상 되도록 한다
- 순시트립 조정범위(Adjustable Trip Range)는 NEC 표 430-152에 따라
 - Design E 전동기 : 전동기 FLC의 1,100%를 넘지 않을 것
 - Design E 이외의 전동기 : 전동기 FLC의 800%를 넘지 않을 것
- 전동기 기동시 위의 정정치에서 트립되는 경우에 불필요한 트립을 방지하기 위해 NEC 430-52 (c)(3) Exception No 1에 따라
 - Design E와 Design B 고효율 전동기 : 전동기 FLC의 1,700%를 넘지 않을 것
 - 그 이외의 전동기 : 전동기 FLC의 1,300%를 넘지 않을 것

(2) 전자(電磁)접촉기

NEMA ICS-2의 Contactor 선정지침은 표 2와 같다. Magnetic Contactor는 순시형 MCCB, 열동과부하계전기 등과 조합되어 하나의 "Listed" Combination Controller로서 정격을 갖게 되므로 MCCB 순시정정값과 Coordination하여 Controller 단락시험시 Contactor가 소손되지 않도록 하여야 한다.

〈표 2〉 NEMA ICS-2의 Contactor 선정지침

Contactor Size	Continuous Current Rating(A)	Horse Power	Locked Rotor Current(A)
1	27	10	88
2	45	25	210
3	90	50	418
4	135	100	835
5	270	200	1670

(3) 열동과부하계전기

- NEC 430-32 (a)(1)과 (c)(1)에 따라 전동기 명판의 전부하전류(FLC)를 기준으로 계전기의 정격이 다음의 값을 초과하지 않도록 선정한다.
 - Service Factor가 1.15 이상인 전동기 : FLC의 125%
 - 온도상승이 40℃를 넘지 않는 전동기 : FLC의 125%
 - 그 외의 전동기 : FLC의 115%
- 위의 정정에 전동기 기동, 부하운전시 불필요한 트립이 발생할 경우 NEC 430-34에 따라
 - Service Factor가 1.15 이상인 전동기 : FLC의 140%
 - 온도상승이 40℃를 넘지 않는 전동기 : FLC의 140%
 - 그 외의 전동기 : FLC의 130%

(4) 지락보호계전기

- MCC로부터 전력을 공급받는 부하들은 대부분 말단부하이므로 지락발생시에 이를 확대시키거나 지연시킬 필요가 없다. 그러므로 영상변류기와 순시과전류계전기(50G)로 사고를 민감하게 검출하고 신속하게 제거토록 하며 지락 계전기는 5A~10A에 정정한다.
- 통상 15hp 이하의 전동기 회로나 30AT 이하의 Thermal Magnetic Type MCCB가 설치된 비전동기 회로에는 별도의 지락 계전기를 설치하지 않고 열동계전기나 MCCB의 상보호기능에 의해 지락보호되도록 한다.

나. 순시형 MCCB 정정시 쟁점사항

(1) 순시트립 오차(Trip Tolerance)

MCCB는 통전 부위의 Magnetization과 기계적 구

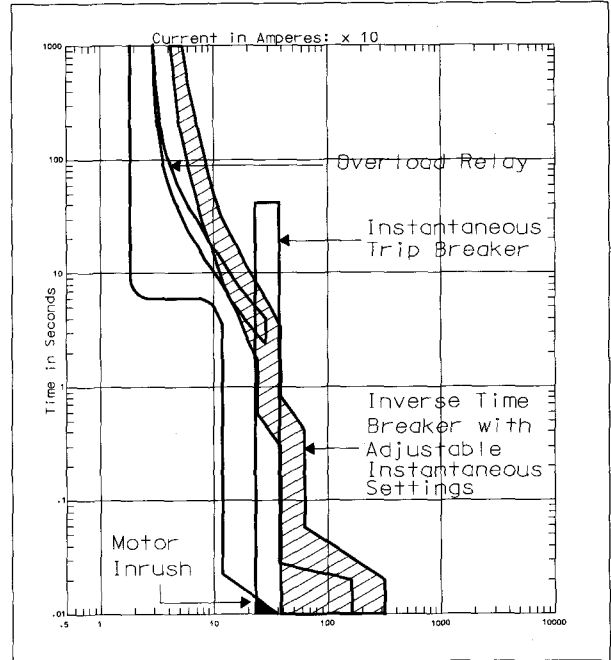
조에 의해 작동되므로 제작자마다 트립전류 오차범위 (Tolerance)를 갖고 있음에 유의하여야 한다. MCCB 제작자 사양에 순시트립 정정값과 함께 Low Setting 과 High Setting 오차를 퍼센트값으로 제시하고 있다. 결정된 MCCB 순시 정정치(눈금)가 Low Setting인지 High Setting인지의 여부를 판단한 후 마이너스(-) 오차값으로는 MCCB 최소동작전류를 결정하여 전동기 기동시의 불필요한 차단기 트립여부를 확인하고 플러스 (+) 오차값으로는 전자접촉기의 전류차단정격의 적정성을 확인한다. 제작자 사양에 각각의 정정치(눈금)에 대해 오차값을 명확히 제시한 경우도 있으나 대부분의 제작자가 Low Setting과 High Setting에 대한 구분이 모호하게 제시되고 있으므로 설계시 선정하고자 하는 MCCB의 오차값 범위에 대해 제작자와의 협의가 필요하다. 참고로 UL Std 489의 MCCB 트립전류 허용 오차 범위는 표 3과 같다.

〈표 3〉 MCCB 트립전류 오차범위(UL Std 489)

MCCB Trip Unit	Low Setting	High Setting
Thermal-Magnetic	± 25%	+ 30% - 20%
Magnetic Only	+ 30% - 20%	+ 30% - 20%

(2) 비대칭 기동전류 (Asymmetric Starting Current)

전동기가 기동할 때 초기 First Cycle에서의 과도전류는 단락사고시의 과도현상과 유사하여 1/2 Cycle에서의 비대칭 기동전류(Asymmetrical Starting Current)는 대칭기동전류의 1.73배로 해석하고 있다. 현재의 순시차단기와 한시차단기는 동작속도가 매우 빨라 정정치를 초과하면 1/2 Cycle 내에 응답하므로 차단기 정정시 최소 동작전류(-오차범위)값이 전동기의 비대칭 기동전류보다 크지 않으면 전동기 기동시 불필요한 차단기 트립을 유발하게 된다(그림 1 참조).



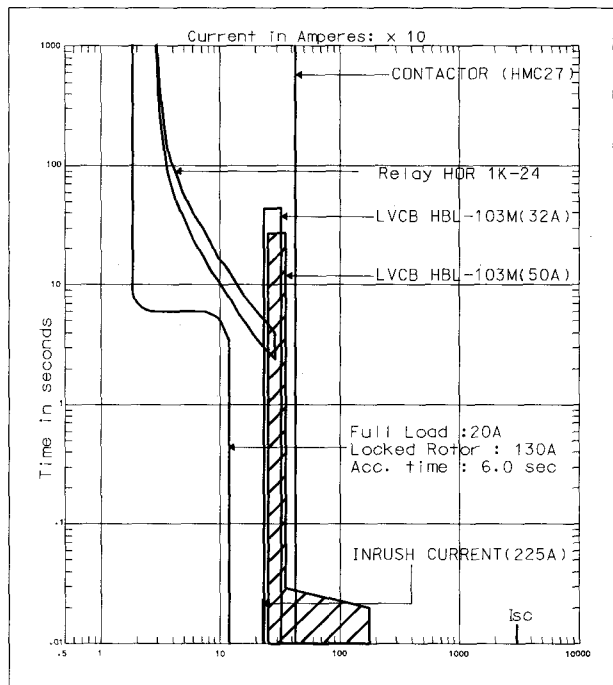
〈그림 1〉 Time-Current Coordination Plot

다. 순시형 MCCB 정정사례

국내외에서 제작되는 표준전동기와 고효율 전동기를 대상으로 MCC를 설계할 때 고려해야 할 사항들을 다음과 같이 MCCB 정정사례를 들어 설명하고자 한다.

사례 NEMA Design B 전동기, 국내 H사

- 전동기 데이터 : 15마력, 440V, 4극, S.F=1.0
FLC=20A LRC=130A
- 예상단락전류 : 30,000A
- 보호협조 : 그림 2 참조
- 정정
 - MCCB
 - NEC 표 430-152에 따라 FLC의 800%(8×20A=160A) 기준으로 순시트립 탭 선정
 - 기동시 불필요한 트립 검토 : 1/2 Cycle Inrush = 1.73×LRC=225A



〈그림 2〉 Time-Current Coordination Plot

225A는 FLC의 800% 기준의 정정에 대해 불필요한 차단기 트립유발 예상됨

- NEC 430-52(c)(3)에 따라 NEMA Design B 전동기는 FLC의 1300% 이내에서 정정가능하므로 $1300\% \times 20A = 260A$ 를 넘지 않는 범위에서 국내 H사 정격 32A 차단기를 선정하여 순시 트립눈금 8.0(250A)으로 재 정정(표 4 참조)
- 위에서 재정정한 250A탭에 HI Setting 트립오

차(±10%)를 고려하면 동작전류 범위는 225A~275A로서 전동기 1/2 Cycle Inrush Current, 225A를 포함하게 되어 순시 탭눈금 8.0(250A)의 선정은 전동기 기동시 여전히 불필요한 트립을 유발할 수 있는 여지가 있다. 결국 정정 탭을 한 단계 올려 눈금 9.0(280A)를 선정하여야 하는데 이 값의 트립오차 범위는 252A~308A로서 전동기 기동시의 불필요한 트립은 피할 수 있으나 순시트립 조정기준에서 허용하고 있는 한계값인 1300%(260A)를 초과하게 되어 Code를 위배하는 결과를 초래하였다.

- 이와 같이 NEC가 허용하는 최대정정값을 초과하는 경우 한시 차단기 또는 퓨즈의 사용을 권고하고 있으나 전동기 Controller 컴퍼넌트들과의 연계, MCC 유닛 구조에 미치는 영향 및 기기가격 등을 고려하여 결정하여야 한다.
- 위 사례에서는 전동기의 1/2 Cycle Inrush Current 225A, MCC 모션 예상단락전류 및 차단기 순시동작 성능 등을 고려하여 정격 50A의 차단기를 재선정하고 순시트립전류 320A(눈금 6.3)에 정정한다.

-Contactor

- Contactor 차단정격이 MCCB 순시트립값의 최대 동작범위값($320A \times 110\% = 354A$)보다 충분히 높아 MCC Unit 시험시 적절히 보호되어 접점의 용착이 방지될 수 있도록 점점 차단정격이

〈표 4〉 MCCB 순시트립 전류(국내 H사 HBL-103M)

정격전류(A)	순시트립전류(A) AC						
	눈금5(6.3)	5.6(7.1)	6.3(8.0)	7.1(9.0)	8.0(10)	9.0(11.2)	10.0(12.5)
32	160	180	200	225	250	280	320
50	250	280	320	350	400	450	500
80	400	450	500	560	630	710	800
100	630	710	800	900	1000	1120	1250

(주) HI Setting 오차 ±10%, LO Setting 오차 ±25% 이내

〈표 5〉 전자 접촉기 정격전류(국내 H사 HMC Series)

형식	통전전류 (A)	사용전류 (A)	주접점 교류투입 전류(500V 기준)	주접점 교류차단 전류(500V 기준)
HMC 27	55	25	470	415
HMC 110	220	110	1630	1400

415A인 국내 H사의 HMC 27을 선정(표 5 참조)

-과부하 계전기

- 전동기 전부하전류의 115%($20A \times 1.15 = 23A$)를 기준으로 국내 H사의 열동형 과부하계전기 HOR 1K-24 선정

-지락보호 계전기(50G)

- 15마력 이하의 전동기에는 적용하지 않는다.

사례 2 NEMA Design B 전동기, 미국 Reliance Electric Co

○전동기 데이터 : 60마력, 460V, 4극, S.F=1.15
FLC=72.4A LRC=405A

○예상 단락전류 : 30,000A

○보호협조 : 그림 3 참조

○정정

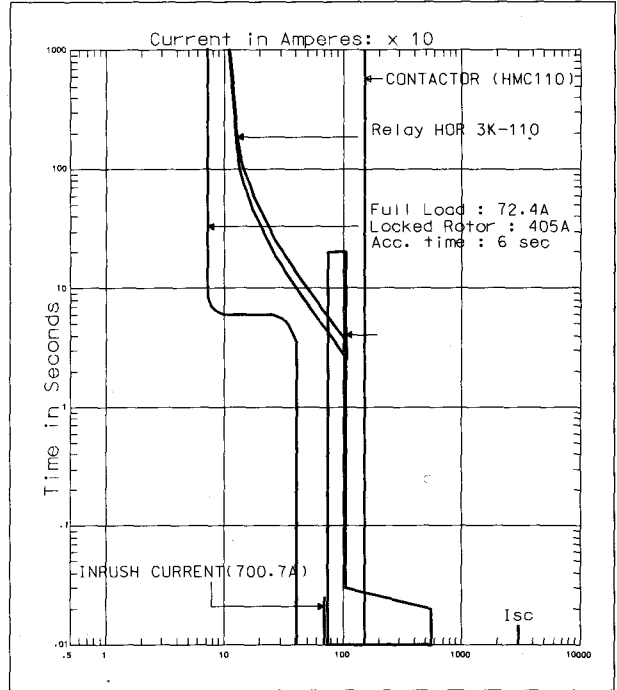
-MCCB

- NEC 표 430-152에 따라 FLC의 800%($8 \times 72.4A = 579.2A$) 기준으로 순시탭 선정

- 기동시 불필요한 트립 검토 : 비대칭 기동전류 = $1.73 \times LRC = 700.7A$

700.7A는 FLC의 800% 기준의 정정에 대해 불필요한 차단기 트립유발 예상됨

- NEC 430-52(c)(3)에 따라 FLC의 1300% 이내에서 정정이 가능하므로 $1300\% \times 72.4A = 941.2A$ 를 넘지 않는 범위에서 국내 H사의 100A정격 순시차단기를 선정하여 눈금 9.0(900A)에 정정한다. 눈금 9.0은 순시조정 중간



〈그림 3〉 Time-Current Coordination Plot

탭으로서 제작자가 권고하는 HI-LO Setting 평균오차 $\pm 17\%$ 를 고려하면 동작범위는 747A~1,053A가 되고 최소동작전류 747A가 1/2 사이클 Inrush Current 700.7A보다 크므로 기동시 불필요한 트립을 피할 수 있다.

-Contactor

- Contactor 접점의 교류차단정격이 MCCB 순시 트립 정정탭의 최대오차범위값인 1,053A보다 충분히 높아 MCCB에 의해 적절히 보호될 수 있도록 국내 H사의 HMC 110을 선정

-과부하 계전기

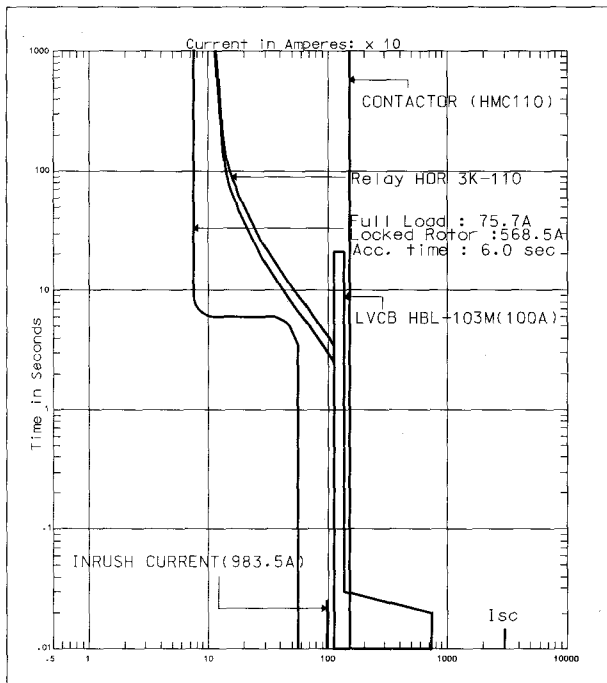
- 전동기 전부하전류의 125%($72.4A \times 1.25 = 90.5A$)를 기준으로 국내 H사의 열동형과부하계전기 HOR 3K-110을 선정

-지락보호 계전기(50G)

- 5A~10A에 정정한다

사례 3 NEMA Design B 고효율 전동기,
국내 H사

- 전동기 데이터 : 60마력, 440V, 4극, S.F=1.15
FLC=75.7A LRC=568.5A
- 예상 단락전류 : 30,000A
- 보호협조 : 그림 4 참조
- 정정
 - MCCB
 - NEC 표 430-152에 따라 FLC의 800%($8 \times 75.7A = 605.6A$) 기준으로 순시탭 선정
 - 기동시 불필요한 트립 검토 : 기동시 1/2 Cycle Inrush= $1.73 \times LRC = 983.5A$
983.5A는 FLC의 800%로 정정에 대해 불필요한 차단기 트립 유발
 - 1999년도에 개정된 NEC에 따라 고효율 전동기에 대한 MCCB 순시탭은 FLC의 1700% 이내



〈그림 4〉 Time-current coordination Plot

서 정정이 가능[NEC 430-52(c)(3)]하므로 $1700\% \times 75.7A = 1,287A$ 를 넘지 않는 범위에서 국내 H사의 100A 정격 순시차단기를 선정하고 정정등급 11.2(1,120A)에 정정한다. 제작자 HI Setting 오차 $\pm 10\%$ 에 대한 동작범위 1008A~1,232A로부터 기동시 1/2 사이클 Inrush Current에 의한 트립 없음을 확인할 수 있다.

고효율 전동기보호 순시트립 정정에 대한
NEC-1999 개정 내용

▶ 개정내용

430-52, (c) (3) Exception No. 1 : 전동기 분기회로의 단락 및 지락보호 순시트립 정정시 Table 430-152에서 규정하고 있는 정정값이 전동기 기동전류에 비해 충분하지 않다면 순시차단기의 정정은 Design E와 Design B High Efficiency 전동기에 대해서는 전부하전류의 1,700%를 초과해서는 안되며 그 이외의 전동기에 대해서는 1,300%를 초과해서는 안된다.

▶ 개정배경

NEC-1996과 그 이전 발행 NEC에서는 Design B High Efficiency 전동기에 대한 순시정정 허용값이 제시되지 않아 Design E 이외의 전동기 정정 허용기준인 전부하전류의 1,300%을 기준으로 정정하였으며 이로 인해 보편적으로 기동전류가 큰 Design B High Efficiency 전동기에 대해서 순시차단기의 선정이 불가능한 경우가 발생하여 이를 해결하고자 하였다.

- Contactor

- Contactor 접점의 교류차단정격이 MCCB 순시트립 정정탭의 최대오차범위값인 1,232A보다 충분히 높아 MCCB에 의해 적절히 보호될 수 있다

- 록 국내 H사의 HMC 110을 선정한다
- 과부하 계전기
 - 전동기 전부하전류의 125% ($75.7A \times 1.25 = 94.6A$)를 기준으로 국내 H사의 열동형과부하계전기 HOR 3K-110을 선정한다
- 지락보호 계전기(50G)
 - 5A~10A에 정정

4. 맺음말

저용량 전동기 보호에 적용하고 있는 순시형 MCCB는 통상 한시-순시형 MCCB에서 한시기능을 제거하고 동일한 기기 Frame에 넓은 범위의 전류정격과 순시 정정 탭을 갖게 하여 전동기 Controller(Starter) 사이즈를 단순화할 수 있게 하였으며 이에 따라 MCC 설계의 표준화가 이루어지고 보다 저렴한 MCC 제작이 가능하게 되었다. 기본설계단계에서 전동기 구속회전자전류(LRC)가 전부하전류의 650%를 넘지 않을 것이라는 가정하에 순시트립 정정값을 LRC의 200%로 하여 설계하고 기기 공급자 결정 후 또는 현장 설치 후 공급자 데이터에 기초하여 상세 정정하는 것이 일반적인 순시형 MCCB 정정절차이다. 하지만 국내제작 일부 NEMA DESIGN B 표준전동기의 경우 구속회전자전류가 전부하전류의 700%~850%에 달하고 있어

한 단계 높은 정격의 순시형 MCCB로 설계변경하거나 기동방식을 변경해야 되며, 이로 인해 MCC 제작비용 상승 또는 공기지연 등의 결과를 초래하게 되므로 MCC 설계자는 기본설계단계에서부터 전동기공급자 설계데이터를 상세검토하여 최적방안을 설계에 반영하여야 한다.

에너지 절약방안의 하나로 빠른 속도로 보급되고 있는 고효율 전동기와 고효율화에 반대급부로 수반되는 전동기 구속회전자전류 상승문제에 대해 미국은 NEC-1999의 개정을 통해 고효율 전동기의 보호에 사용되는 순시형 MCCB 정정기준을 상향 조정하여 고효율 전동기의 적용시 발생할 수 있는 순시형 MCCB의 오동작 문제를 해결함으로써 고효율 전동기의 적용을 더욱 촉진하게 되었다. 국내 제작 고효율 전동기의 경우 해외 제작 전동기에 비해 상대적으로 구속전류가 높은 편으로 MCCB와 Contactor 정격이 커질 수 있는 요인이 될 수 있으며, 이로 인한 MCC 초기투자비 상승으로 고효율 전동기에 의한 에너지 절감효과가 반감될 우려가 있다. 또한 전동기 기동시의 허용 Stall Time이 짧아질 수 있으므로 전동기 과부하 보호 협조에 세밀한 주의가 필요하며 전동기 제작자로부터 고효율 전동기의 정확한 기동시간 및 허용 Stall Time이 제공되어 MCC의 적절한 보호협조 설계가 이루어질 수 있도록 해야 한다. ■

참고 문헌

- NEC 1999 : National Electrical Code
- NEMA MG-1 1993 : National Electrical Manufacturers Generators
- NEMA Standard Publication No. ICS 2, 1993
- IEEE Std 1015 1997 : IEEE Recommended Practice for Applying Low Voltage Circuit Breakers
- IEEE Transaction IA, July/August 1998, pp 697~704 "Application Guidelines for Instantaneous-Trip Circuit Breakers in Combination Motor Starters"
- IEEE IA Magazine, January/February 1997, pp 41~44 "Short Circuit Protection of Energy-Efficient Motors"
- IEEE PCIC Conference 1997, pp 11~23 "A Flow Chart Methodology for Performing Low-Voltage Three-Phase Motor Coordination Studies"