

이은웅, 김중겸, 조현길

Analysis of electrical stress of motor winding by steep-fronted surge voltage

Eun-woong Lee, Jong-gyeum Kim, Hyun-gil Cho
Chungnam National university

Abstract

In this study, electrical stress of the steep-fronted surge voltage which is distributed into motor winding in switching has been analyzed by multiple-conductor transmission equation. We see that the greatest electrical stress appears at the last turn of the first coil of motor.

1. 서론

전공차단기의 제단과 재발호씨는 매우빠른 상승시간의 과도 전압을 이르고 이 급준도 써지전압이 유도전동기 고정자 권선에 침입하여 강한 전기적인 스트레스로 작용하게 되므로서 코일 절연을 위협하게된다[1,2,3].

저자는 이 써지전압의 해석[1,2]과 저감대책[1]을 연구 발표한 바 있는데 그 연구와 관련하여 본 연구에서는 고정자 권선에 침입하는 급준 써지전압의 권선에서 분포되는 현상을 해석하고자 한다.

따라서 고정자 코일의 구조가 다중도체 전송선 방정식과 유사한 구조로 되어 있음을 감안하여 다중도체 전송선 방정식을 기본으로 한 전자계과도프로그램(EMTP)을 이용하여 권선에서 급준파 써지전압의 분포를 해석 하였다.

고압 유도전동기의 고정자 코일에 급준파 써지 전압의 분포를 해석하기 위해 모델 전동기를 선정하고, 코일 파라미터 계산은 Barcvaro등의 방법[3]을 적용하여 고정자 코일 구조를 4 개의 원형 도체로된 지중케이블 구조로 변환한 다음 지중케이블의 파동전파를 해석하기 위해 개발되어 있는 전자계과도프로그램(Electro-Magnetic Transients Program:EMTP)을 이용하여 코일에서의 전압분포를 해석하였다. 그리고 그 결과를 같은 모델의 다중도체 전송선 방정식으로 해석한 Guardado 와 Cornick의 결과와 비교하여 연구의 타당성을 확인하였다.

2. 기본이론

그림 1 과 같은 코일은 活性域(active zone)인 슬롯(slot)속에 들어있는 부분과 슬롯밖의 오비행(overhang)부분으로 나누어 생각할 수 있다. 써지가 권선 입구로 침투할 때, 오비행에서 슬롯내 코일로 전파되는 것과 역으로 단부코일로 반사되는 것으로 나누어진다[2,4].

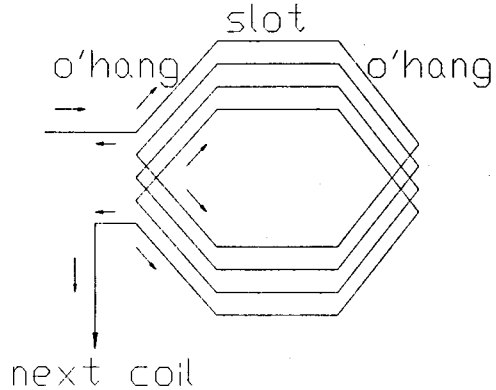


그림 1. 코일 입구에서 첫써지 분포
Fig 1. Initial surge distribution at nose of coil

전송된 써지는 슬롯내 두번째 턴의 입구부에 도달할 때 까지 단부코일을 따라 전파하며 슬롯 입구부에서 비유전율이 다른 슬롯과 오비행의 임피던스차로서 반사와 굴절이 발생한다. 슬롯과 오비행에서 써지는 코일의 턴수와 같은 다중도체 전송선로처럼 전파하기 때문에 일련의 중속된 파라메터 선로로서 모델화할 수 있다[5].

상영역에서의 다중도체 전송선 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\left[\frac{d^2 V_p}{dx^2} \right] = [Z_p][Y_p][V_p] = [P][V_p] \quad (1)$$

$$\left[\frac{d^2 I_p}{dx^2} \right] = [Y_p][Z_p][I_p] = [P_t][I_p] \quad (2)$$

여기서 V_p 와 I_p 는 상영역에서의 열벡터, $[P] = [Z_p][Y_p]$, $[P_t]$ 는 $[P]$ 의 천이행렬(transpose matrix)이며 $[Z_p]$ 와 $[Y_p]$ 는 상영역에서의 어드미턴스 행렬이다.

분포된 파라메터를 가진 다중도체 선로방정식을 풀기위해서 상영역에서는 비대칭성분을 포함하고 있기 때문에 해를 얻기되지 않은 독자적인 것으로 하기 위해서는 우선 변환행렬 $[T_v]$, $[T_i]$ 을 도입하여 상영역에서 비대칭 성분을 모드영역에서 대칭 성분으로 식(3) 와 식 (4)과 같이 변환한다[4].

$$[V_p] = [T_v][V_m] \quad (3)$$

$$[I_p] = [T_i][I_m] \quad (4)$$

여기서 V_m : 모드전압 열 벡터(modal voltage column vector)

I_m : 모드전류 열 벡터(modal current column vector)

따라서 상영역에서 식(1)과 식(2)는 식(3)과 식(4)을 이용하여 모드 영역으로 변화시킨 경우 식(5)와 식(6)을 구할 수 있다.

$$\left[\frac{d^2 V_m}{dx^2} \right] = [T_v^{-1}] [P] [T_v] [V_m] = [\gamma^2] [V_m] \quad (5)$$

$$\left[\frac{d^2 I_m}{dx^2} \right] = [T_i^{-1}] [P_i] [T_i] [I_m] = [\gamma^2] [I_m] \quad (6)$$

여기서 γ^2 는 고유값으로 구성된 대칭행렬이고, γ 는 대칭오드의 전파정수다.

식(5)의 전압에 대한 해는 상영역을 모드영역으로 변환한 전압이 되며 식(7)과 같다.

$$[V_m] = [T_v] \varepsilon^{-\gamma x} [V_s] + [T_v] \varepsilon^{\gamma x} [V_r] \quad (7)$$

여기서 V_s, V_r 는 선-단코일에서 구해지는 송-수신단의 전압이다.

상영역에서 모드영역으로 변환한 식(7)을 다시 상영역으로 재변환 하기 위해 식(3)에 대입하고 'x' 지점에서의 분포전압 [V]를 구하면 식(8)과 같이 된다.

$$[V] = [T_v] \varepsilon^{-\gamma x} [T_v^{-1}] [V_s] + [T_v] \varepsilon^{\gamma x} [T_v^{-1}] [V_r] \quad (8)$$

이 식 (8)이 모드 영역에서 다시 상영역으로 변환한 다중도체 전송선방정식으로서 급준과 써지가 전동기의 코일에 침입하여 진행되는 현상을 해석하는데 이용된다.

3. 코일의 써지전압분포 해석을 위한 모델

3.1 모델 전동기와 해석의 적용

급준과 써지에 의해 발생한 고정자 코일의 전기적인 스트레스를 해석하기 위해서 채택된 모델용 전동기의 사양은 표 1 과 같다.

표 1. 해석 기기의 사양

Tag 1. The details of electrical machine for analysis

구분	내용
형식	동형 유도전동기
전압	6.6 [KV]
정격출력	1,640 [KW]
극수	2
권선 결선법	비접지 Y 결선
평균 턴 길이	3.8 [m]
고정자 코일당 턴수	8
고정자 철심내 비부자율	4,500
Core 길이	750 [mm]
Bore 직경	510 [mm]
고정자 턴 치수	3 mm x 9 mm
고정자 코일의 턴사이 이격거리	0.4 [mm]
절연물의 비유전율	3.7
주절연 두께	2.3 [mm]

고정자 슬롯의 오비행 파라미터를 구하기 위해서는 지중케이블 파라미터를 구하기 위해 개발된 EMTP 프로그램의 서브루틴으로 각 영역에서의 파라미터를 구하여야 한다.

3.2 슬롯 및 오비행 모델링

EMTP 서브루틴으로 고정자 코일내부로 분포된 전압 파형

을 해석하기 위한 입력자료를 얻기위해 고정자 코일당 8 턴의 슬롯과 오비행의 길이를 고정자 코일당 4 턴의 2 배로 변형시켰다. 고정자내 4 가닥의 각형도체 구조의 그림 2(a)는 4 가닥의 원형도체 구조의 그림 2(b)를 변형한다. 고정자 철심의 양측의 오비행 부분도 같은 방식으로 변형시켰다.

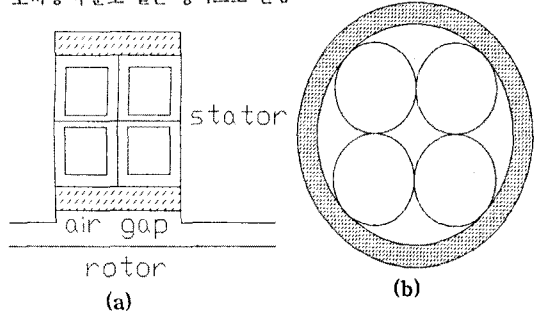


그림 2. 변형된 코일 모델

3.3 코일 모델링

급준과 써지가 다중도체 전송선과 같이 고정자 코일의 내부에서 전파되는 것을 해석하기 위해서는 그림 1 에 나타낸바와 같이 고정자 코일의 두 슬롯과 두 오비행 부분은 EMTP의 지중선로 서브루틴으로 구한 각 부분의 임피던스와 어드미턴스 행렬을 직렬연결하여 계산된 값들을 직렬 연결하여 하나의 코일로 모델링하였다.

급준과 써지가 코일의 입구부에 침입할 때 EMTP 서브루틴의 사용으로 구한 임피던스와 어드미턴스 매트릭스를 식(8)에 대입하여 입구로 부터 'x' 지점의 전압분포가 계산된다.

4. 해석결과

4.1 써지 파형의 영향

그림 3 은 인가된 써지전압의 파두장이 짧을수록 턴과 턴 사이 나타나는 파형의 변화 비율과 전압의 크기가 커진다는 것을 나타낸다. 그림 3 에서 1 은 첫번째 턴의 입구측에 인가된 급준파이고 2 는 두번째 턴-대지간이며 3 과 4 도 마찬가지다.

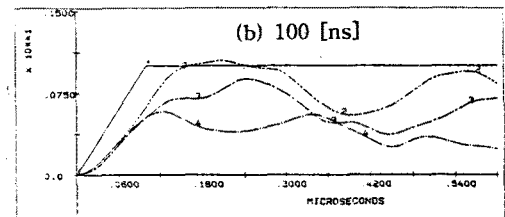
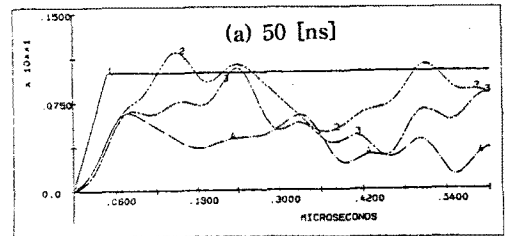


그림 3. 첫번째 코일의 턴대지전압대 파두장의 기간

약 100[ns] 파두장의 써지가 인가될 경우 첫번째 코일의 턴 대지에서 전압분포는 인가된 써지의 전압 보다 크다는 것을 알 수 있다.

4.2 코일전압

그림 3 에 나타낸대로 인가된 써지의 파두장이 첫번째 코일의 끝단에 도달할 때, 급준파 써지의 한 부분은 첫번째 코일의 턴을 통과하고 나머지는 두번째 코일의 연결점과 선단코일에 반사하게 된다. 그림 4 는 100[ns] 의 파두장을 가진 급준파 써지가 고정자 권선의 입구부에 인가될 경우 고정자 슬롯 코일의 턴사이 나타나는 전압의 변화를 같은 조건에서 다중도체 전송선 방정식으로 해석한 Guardado 와 Cornick의 연구결과와 비교한 것이다. 여기서 본 연구결과가 Guardado 와 Cornick등이 구한 결과와 유사함을 알 수 있다.

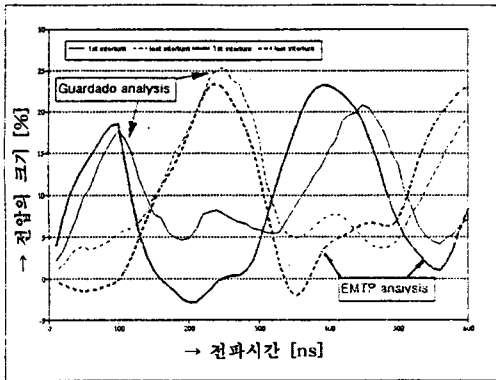


그림 4. 100[ns]의 파두장에 대한 계산결과

5. 결론

급준파 써지가 고정자 권선의 내부에 침입할 경우 권선내부에서의 변화를 EMTP 서브루틴을 이용하여 턴사이와 턴대지사이 나타나는 전압의 분포를 해석하고 Guardado의 연구결과와 비교하였다.

그래서 급준파 써지의 파두장이 짧을수록 써지전압의 파형은 비선형으로 변화를 일으키며 또한 가장 높은 전기적인 스트레스는 첫번째 코일의 마지막 턴에 나타남을 알 수 있었다.

따라서 유도전동기와 같은 설비에서 고정자 권선의 첫번째 코일의 마지막 턴에 침입하는 급준파 써지의 크기와 준도를 줄이기 위해서는 파형의 준도를 줄일 수 있는 보호설비를 구비하여야 할 것으로 생각한다.

參 考 文 獻

- [1] 이은용, 김중겸, 김택수, 이성철, "고압전동기용 전공차단기의 스위칭써지 해석 및 저감대책연구", 전기학회 논문지, 제 43 권, 제 5 호, pp.761~769, 1994. 5
- [2] 이은용, 김중겸, "진행파법에 의한 스위칭 써지전압 해석", 전기학회 논문지, 제 43 권, 제 8 호, pp.1252~1258, 1994. 8
- [3] D.C.Bacvaro et al., " Risk of winding insulation breakdown in large AC motors caused by steep switching surge: part 1, computed switching surges " IEEE Trans. on EC, vol.1, no.1, pp. 130-137, 1986.
- [4] L.M.Wedepohl and B.Sc, " Application of matrix methods to the solution of travelling-wave phenomena in polyphase systems ", Proc IEE, vol.110, no.12, pp. 2200-2212, 1963.
- [5] J.L.Guardado and K.J.Cornick, "A computer model for calculation steep-fronted surge distribution in machine windings", IEEE Trans. on EC, vol.4, no.1, pp.95-101, 1989.