

# 스위칭 서지에 의한 고압유도전동기의 권선의 전기적 스트레스 해석

◦김종겸\*, 이은웅\*\*, 김일중\*\*\*

수자원공사\*, 충남대\*\*, 주성전문대\*\*\*

Electrical Stress Analysis of High Voltage Motor Winding by Switching Surge

Kim, Jong Kyeom LEE, Eun Woong Kim Il Jung

KOWACO, Chung-Nam National University, Ju-Seong Junior College

## Abstract

Studies have been made to establish what coil design parameters have an important influence on the amplitude of interturn voltages developed in a machine winding subject to steep-fronted surges. The studies are based on a lattice-diagram model of multiconductor transmission line in a machine winding energised by a simple ramp function.

Variations in interturn voltages produced by changes in insulation thickness, insulation permittivity, surge wave-front are examined and certain guidelines for avoiding high interturn voltages are evaluated.

## 1. 서론

생산설비를 구동시키는 전동기의 고장으로 생산공정이 멈추게 되면 전동기를 수리하거나 교체하는 비용을 훨씬 초과하는 가속한 경제적인 손실을 입을 수도 있다. 따라서 스위칭 서지에 의한 전기적 스트레스로 특히 고정자의 절연파괴가 발생하는 것을 줄이는 것은 전동기의 신뢰도를 향상시키는데 중요한 몫을 한다.

본 논문에서는 정상적인 스위칭동작이 이루어지는 동안 전동기 권선의 권선과 권선사이의 절연에서 일어날 수 있는 전기적 스트레스를 해석하기 위해서 우선 고정자 권선의 코일과 권선사이 임펄스전압의 분포를 구한다.

그리고, 유도전동기 단자에 가해지는 과도전압에 대한 영향을 알아보기 위해 격자도법(lattice diagram)을 사용하여 권선간 전압과 대지간의 전압 분포도를 알아내어서 스위칭 과전압의 영향을 저감하기 위한 설계 변수의 자료를 제시하고자 한다.

## 2. 기본이론도출

상당히 빠른 속도로 권선사이에 침입하는 전압을 정확하게 설명하기 위해서는 등가회로가 요구되지만, 그 회로망에서 요소를 밝히기도 어렵고, 해석도 결코 쉽지 않다. 그래서 결국 현재로서는 서지분포라 하는 상당히 단순화된 개념을 체계적인 설명으로 시작한다.

전동기의 권선은 일련의 코일로 구성되며, 그 코일은 직렬 인덕턴스와 병렬 캐패시턴스 요소로 되어 인위적인 전송선과 같은 특성을 가진다. 스위칭 서지파가 근사적으로, 급준파동이 전송선을 따라 전파되는 것과 마찬가지로 전동기의 권선속으로 이동한다. 서지전압파동이 권선을 통해 어떤 속도로 이동하면, 권선은 마치 유한한 서지 임피던스를 가진 전송선에 파동이 지나가는 것처럼 작용한다. 그림 1 은 초기서지의 입사전파경로를 나타낸 그림이다.

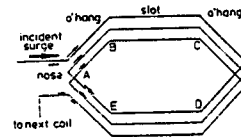


그림 1. 코일입구에서 전압분포

서지가 선단코일의 입구에 침입할 때, 서지는 입구를 지나 다중도체 전송선 서지로 나누어진다. 전송된 서지는 이들이 서지 임피던스가 변화는 슬롯 입구에 도달할 때 까지 overhang을 따라 전파한다. 이는 반사와 굴절 때문이다. 각 부분에서 서지는 코일에서 도체와 같은 수를 가지고서 다중-도체 전송선에 전파한다. 이 전파는 수많은 독립된 방식의 전파와 같다.

## 3. 모델 파라미터

### ① 슬롯부분에 대한 변수의 계산

鐵心 슬롯내 들어있는 卷線導體(turn conductors)의 시스템은 卷線導體가 서로 병렬로 쌓아 있는 직사각형 對稱으로 나타난다. 그리고 슬롯벽은 권선도체 표면에 對列이다. 슬롯벽을 등전위(접지)표면으로 나타내기 위해 卷線導體사이 캐패시턴스와 卷線에서 接地에 이르기 까지의 캐패시턴스는 식(1)과 같이 對列 평판 캐패시턴스 공식을 사용하여 計算되어진다.

$$C = (\epsilon_0 \epsilon_r w) / s [F/m] \quad (1)$$

여기서  $\epsilon_0$  는 자유공간의 유전율,  $\epsilon_r$  유전체의 비유전율,  $w$  는 평판 幅이고,  $s$  는 평행판 사이 距離이다.

### ② overhang 부분에 대한 변수의 계산

식 (1)로 계산한 인접한 코일사이의 캐패시턴스가 卷線 도체사이에는 均一하게 分布된 것으로 계산한다. 여기서 비유전율( $\epsilon_r$ ) 은 이 경우에 유전체가 대개 空氣 이기 때문에 1 이다.

### ③ turn간 전압에 대한 미분 파형의 전파

코일 설계 變數에서 변화를 가진 turn간 전압의 변동에서 推移를 알아내기 위해 보다 간편한 모델인 권선간 전압의 빠른 평가를 요구하는 상황에서나 서로 다른 코일 설계의 빠른 비교를 위해 필요하게 된다.

卷線端子에 서지대 접지(surge-to-ground)의 적용은 線端 코일의 첫번째 권선을 지나 분명한 권선간 펄스를 낳는다. 이 펄스는 권선간 서로 다르게 전파되는 것으로 나타내며, 이것이 코일의 끝단에 도달할때 까지 방해를 받지 않는다. 이는 여기서 들어오는 펄스와 같은 극성을 가지고서 반사되는 것으로 생각된다. 입사와 반사 파동은 마지막 권선을 지나 최대 스트레스를 낳도록 합성된다.

권선간 미분 파동은 코일의 길이를 통해 한쌍의 권선도체사이 안내 되어진 것으로 해석상 생각한다. 인접 도체사이의 공간은 전송선을 형성한다.

등가 선로를 따른 권선 대지간 전압은 코일에서 턴간 전압과 일치한다. 그래서 등가선로의 길이는 한 권선 길이에 의해 코일보다 훨씬 짧아진다. 등가 선로에 대한 전파속도는

$$v = c / \sqrt{\epsilon_r} \quad (2)$$

코일 절연물의 비유전율이 약 4 인 경우 전파속도는 빛의 속도의 약 절반이다. 선로의 서-지임피던스(  $Z_d$  )는 식 (1) 과 (2), 그리고  $1 / (v \cdot c)$ 로써 나타내는 고전적인 서지임피던스 표현으로부터 계산된다

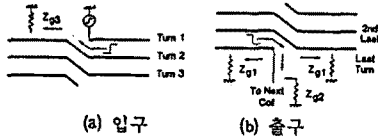
$$Z_d = s / (\omega_t C \epsilon_0 \sqrt{\epsilon_r}) \quad [\Omega] \quad (3)$$

코일 出口나 코일 入口에 到着한 미분 파동(differential-wave)은 임피던스값이 불연속이기 때문에 散亂된다. 코일 出口에서, 입사되는 파동의 전송된 부분은 그림 2a 에 나타낸것처럼 3 要素로 나뉘어진다. 각 방향에서 마지막 권선대 접지를 따라 전파하는 성분에 대한 서지 임피던스 그림 2a 에서  $Z_{g1}$ 는 슬롯 부분에서 두가지 병렬 통로 즉, 권선대 슬롯벽과 같은 슬롯내 인접하는 코일과 권선에 의해 정의된다.

식 (3) 를 사용하여 서지임피던스  $Z_{g1}$  을 구하면 식 (4a)와 같다.

$$Z_{g1} = 400 [S_g / (\omega_t + 4h_t)] \quad [\Omega] \quad (4a)$$

여기서  $S_g$  는 접지벽 절연두께,  $\omega_t$  는 권선도체(turn conductor) 幅과  $h_t$  는 권선도체 높이이다.



(a) 入口 (b) 出口

그림 2. 입, 出口에 도달하는 미분파동에 의한 종단임피던스

그림 2(a) 에서  $Z_{g2}$  는 다음 코일에서 계속되어지는 파동에 의해 구해진 서지 임피던스이다. 코일 入口에서 첫 권선은 슬롯의 상부로서 그 값은 식 (4b)와 같다.

$$Z_{g2} = 100 (S_g / h_t) \quad [\Omega] \quad (4b)$$

코일 入口에서 권선 1 대 접지 서지임피던스를 나타내는 그림 2 (b)에서  $Z_{g3}$  는 권선 도체가 되돌아오는 코일 부분에서 슬롯의 바닥까지 구한 것이다.

$$Z_{g3} = 200 [S_g / (2h_t + \omega_t)] \quad [\Omega] \quad (4c)$$

이때 코일 出口나 코일 入口에 到着하는 미분 波動에 의해 알았던 終端 임피던스  $Z_t$  는 식 (4) 이다.

$$Z_t = Z_{g1} + [(Z_{g1}Z_{g2}) / (Z_{g1} + Z_{g2})] \quad \text{코일 出口}$$

$$Z_t = Z_{g3} \quad \text{코일 入口} \quad (4d)$$

反射係數  $S_r$  은 식 (5) 이다.

$$S_r = (Z_t - Z_d) / (Z_t + Z_d) \quad (5)$$

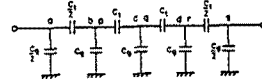
$Z_{g1}$ ,  $Z_{g2}$  와  $Z_{g3}$  는 접지에서 상당히 큰 공간 때문에  $Z_d$  보다 실제적으로 훨씬 크다. 그러므로  $Z_t$  는 코일 出口가 다음 코일에 연결되어 있던, 접지되든, 遮蔽되든 관계없이  $Z_d$  에 비해 상대적으로 크다. 그래서 반사계수  $S_r$ 은 恒常 正(+ ) 極性이고, 입사되는 미분 파동이 같은 극성을 가지고서 반사된다는 것을 나타낸다. 반사된 요소는 권선간 공간을 통해 뒤로 이동하고, 코일 入口에서 正(+ ) 反射를 겪으며, 코일 出口에서도 마찬가지로.

모든 권선간 캐패시턴스(그림 3a)의 상호연결을 고려하면 그림 3(b)의 등가회로망을 낚는다. 단순화를 위해 그림 3은 모든 권선에 대해 대지에 동일한 캐패시턴스로 나타낸다. 비록 실제적으로는 첫번째와 마지막 권선이 대지에 접하는 상당히 큰 표면적 때문에 대지간에 상당한 캐패시턴스를 가진다. 그리고 이는 계산상 고려해야 한다. 캐패시턴스 값은 식(1)을 사용하여 계산된

다. 코일의 끝단은 뒤이어진 코일이 전기적으로 떨어져 있기 때문에 개방된 회로로 간주된다. 이 회로망은 한 스텝 서지가 코일의 한 끝에 인가될 때 각 권선을 거쳐 대지에서 순간전압을 결정하기 위해 사용된다. 합성 권선간 전압은 선단(line end)코일에서 권선을 지나 초기에 인가된 미분파동의 크기를 나타낸다.



(a) 4 - 권선코일에 대한 코일 돌출부에서 캐패시턴스의 도식도



(b) 초기 턴사이 계산을 위한 합성 회로망

그림 3. 4 - turn 코일의 캐패시턴스 상세도

격자도(Lattice diagram)형태 접근은 傳播하는 성분을 계속 추적하게 하고, 합성電壓이 선로를 따라 각 시간 스텝에서 계산되어지게 한다. 이같은 방법으로 구해진 해는 한 스텝여자(a step excitation)에 응답한다.

#### ④ 고정자에 미분파동 모델의 적용

우선 표 1 에 주어진 기본모델의 코일 치수를 使用하여 식(3) 과 식(4)로 부터 서지 임피던스를 계산한다.

표 1. 기본모델규격

정 격 (KV, HP)	턴수	턴길이 (cm)	슬롯 깊이 (cm)	절 연 두께		권선도체치수	
				turn (mm)	접지벽 (mm)	높이 (mm)	폭 (mm)
6.6, 11000	6	480	120	1.3	3.6	4.3	14.5

미분 파동에 대한 반사계수는 식 (4d)와 식(5)로 부터 구하고, 다음으로 초기 서지의 용량성 분포 때문에 초기 분포를 결정해야 한다. 각 권선에 대한 대지캐패시턴스는 식 (1) 로 부터 슬롯면쪽(slot sides) 영향을 고려하고, 각 합성 캐패시턴스 회로망을 그림 3a 로 부터 구한다.

이 회로망으로부터 계산된 초기 권선간 전압분포( 인가된 스텝서지 때문에 )는 주어진 격자도 해에서 시간 스텝의 기동점(starting point)이다.

유한의 상승시간 파두장에 대한 권선간 전압을 결정하기 위해서는 優先 권선당 이동시간을 計算하여야 한다. 이들 코일에 대해 turn 길이와 빛의 속도의 약 50%의 전달속도를 사용하여 식 (2) 로 부터 이동속도를 구한다.

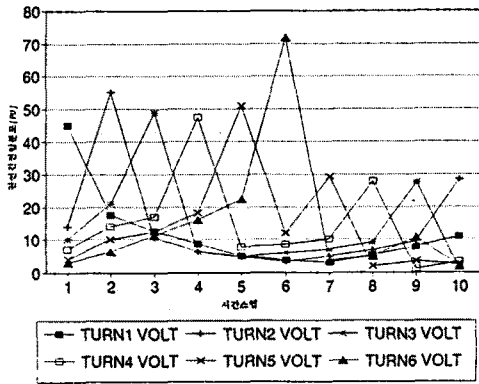
#### 4. 각 부분별 제한상 (turn간 전압에서 설계파라미터의 영향)

사실 기기권선에서 서지의 분포는 여러가지 요소에 의한 영향 때문에 복잡한 현상의 집합체이다

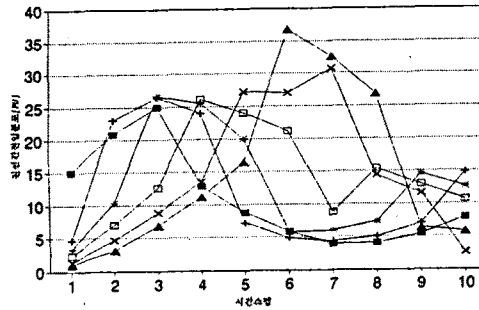
##### ① 서지 파두장의 영향

서지 파두장은 기기의 권선에서 과도전압의 크기에 주요한 영향을 지닌다. 매우 짧은 파두장을 가지는 초기펄스의 상당한 부분은 단지 코일을 거쳐 나타난다. 100[ns] 보다 짧은 파두장에 대해 전압은 항상 일정하지 않고 인가된 스텝함수에 대해 용량성 분포로 접근된다.

입사하는 급준파 서지에 대해서는 격자도 해는 권선간 전압을 결정하기 위해서는 평균 스텝에 걸쳐 계산되어진다. 보다 높은 서지 파두장에 대해, 해는 상당히 많은 시간스텝에 걸쳐 평균되어지고, 예상된대로 약간 낮은 피크 권선간 전압을 발생하게 한다. 서지 파두장에 대해 평균되어진 결과는 그림 4 와 같다.



(a) 32[ns]



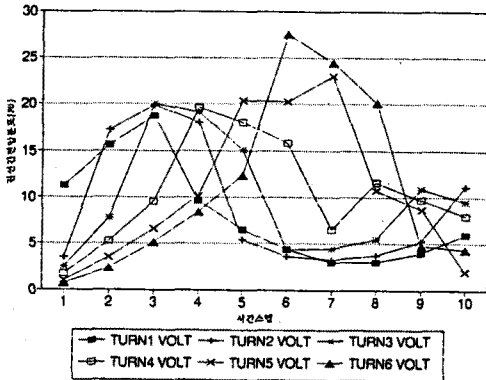
(b) 100[ns]

그림 4. 서지 파두장의 변화에 따른 전압분포도

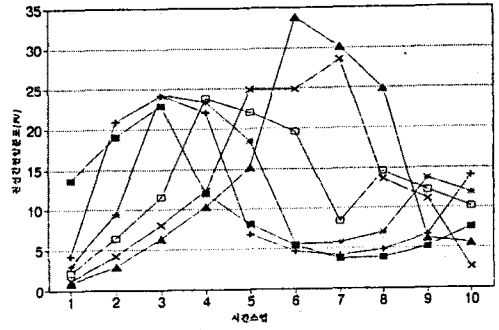
그림에서는 32, 200[ns]의 급준파 서지에 대한 권선내부의 전압 분포에서 영향을 조사한 결과, 급준파 서지의 전파속도가 빠를수록 그 진폭은 크다는 것으로서, 이는 권선내부에 침입하는 스위칭 서지와 같은 급준파가 도래할 경우에 권선의 절연을 위협할 수 있다는 것을 의미한다.

② 절연 유전율의 영향

절연 유전율의 변화는 권선간 전압을 이동 시킬뿐만 아니라, 그 크기에서도 영향을 가진다. 비유전율의 증가는 권선당 이동시간이 비유전율에 반비례하기 때문에 증가하며, 또한 선로 임피던스가 감소하므로 코일의 입출구에서 반사계수는 커진다. 따라서 권선 대지간 및 권선간 캐패시턴스는 커지게 된다. 그래서 일반적으로 비유전율의 증가는 권선간 전압의 상승을 일으킨다. 그림 5는 비유전율의 증가에 대한 turn간 전압분포를 나타낸 그림이다. 초기의 캐패시턴스 전압분포는 거의 동일하나, 100[ns]의 파두장에 대한 권선내 전압분포에 대해 살펴보면 단지 약간의 전압상승효과를 가진다는 것을 알 수 있다.



(a)  $\epsilon = 3.2$



(b)  $\epsilon = 3.6$

그림 5 절연 유전율의 변화에 따른 전압분포도

③ 절연두께의 영향

서지분포에서 절연두께의 영향은 권선 대지간과 코일내부 권선사이 용량성 결합에 의해 결정되어진다. 그래서 권선절연의 두께의 감소는 권선간 결합이 감소되기 때문에 서지 전파에 대해 권선내부에서 권선간 전압을 감소시킨다.

한편 권선간 절연 두께의 증가시 초기의 권선내 전압분포는 증가하나, 권선내부로 들어갈수록 동등하지만, 시간스텝에 따라 전압분포는 달라지게 된다. 약 100[ns]의 파두장에 대해서 권선내 전압분포는 단지 약간의 증가를 낳는다는 것을 알 수 있다.

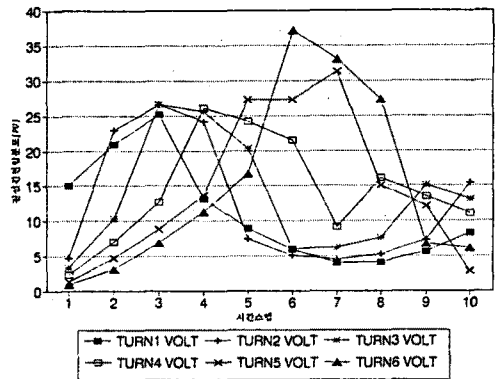


그림 6. 절연 두께의 변화에 따른 전압분포도

5. 결론

일반적으로 가장 높은 권선간 전압이 첫번째 코일을 지나서 일어나는 것이 아니라 실제로 선단코일에서 마지막 권선을 지나 일어난다는 것을 알 수 있었다.

권선간 절연에 미치는 영향이 큰 파두장 길이는 파두장 기간이 짧을수록 권선간 전압은 커진다. 이는 여러 권선을 가진 코일에서 보다 작은 수의 권선을 가진 코일에서 더욱 크다는 것이다.

유전율과 절연두께에 대한 변화는 이차적인 요소로서 권선간 전압에서는 단지 약간의 영향을 미치는 것으로서 파두장의 영향에 비해서는 작지만, 설계시에 제반사항의 고려되어야 할 사항이다.

6. 参考文献

- 1) IEEE Working Group Report, " Impulse Voltage Strength of AC Rotating Machines ", IEEE Trans PAS, August , pp. 4041-4053.1981
- 2) A. Narang et al., " Measurement and Analysis of Surge Distribution in Motor stator windings " IEEE Trans on Energy Conversion, Vol.4, No.1, pp. 126 ~ 134.1989
- 3) J.L. Guardado et al., " The Effect of Parameters on the Distribution of Steep-Fronted Surges in Machine Windings " IEEE Trans on Energy Conversion, Vol.7, No.3, pp. 552 ~ 558.1992