

발전소 배전계통 진공차단기의 스위칭 썬지 해석

김익모, 김지홍
현대중공업 기전연구소

Switching Surge Analysis of Vacuum Circuit breaker at the power plant distribution lines

Ik-Mo Kim, Ji-Hong Kim
Hyundai Heavy Industry Mechatronics Research Institute

Abstract - The first objective of this study is to set up the switching surge analysis method in motor driving distribution system. The simplified model which can simulate the motor energization and circuit breaker re-ignitions, and each circuit element model is presented in this paper. The second objective is to calculate the quantity of surge over-voltage in real nuclear power station. And the surge suppressing measures are verified on the simulation basis. It is clarified that most cases are not satisfactory to meet the IEEE standard 522-1992 without using surge suppressing measures. In cases that the surge arrester are installed in distribution board at the load side of circuit breaker, The IEEE specification is fully met.

1. 서론

진공차단기는 다른 차단기에 비하여 저가격, 유지보수의 용이성등으로 배전계통에의 적용에 많은 이점을 갖고 있다[1]. 따라서, 이러한 진공차단기는 유도전동기를 기동 정지하는 장치로서 주목되고 있는데, 계통 적용시 진공차단기 작동시의 급준파 스위칭 과전압의 발생이 문제점으로 지적되어 왔다. 일반적으로 유도전동기는 배전계통의 다른 기기에 비해 절연이 가장 취약하므로, 이러한 진공차단기의 스위칭 과전압에 대한 보호대책으로 썬지 억제기, 썬지 피뢰기, 썬지 커패시터등의 설치가 요구되며, 그 적정성 평가가 이루어져야 한다[2,3].

이에, 본 논문에서는 울진 원자력 발전소 5.6호기의 실제 계통에 진공차단기를 유도전동기의 기동과 정지에 적용하였을 때의 스위칭 썬지에 대해 EMTP를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과를 IEEE Guide "교류 회전기의 성형 고정자 코일의 권선간 절연 시험"의 Standard 522-1992에 기초한 유도전동기의 임펄스 능력과 비교하였다. 또한 변압기가 배전계통에 있을 경우에 대하여도 썬지 검토를 하였다. 이를 통하여 유도전동기의 진공차단기 썬지에 대한 보호장치의 필요여부를 판단하고, 썬지 억제 대책으로 진공차단기가 설치된 배전반의 부하측에 썬지 어레스터를 설치하여, 유도전동기 보호 대책의 적정성을 검증하였다.

2. 본론

2.1 IEEE Standard 522-1992

배전계통에 진공차단기를 사용하여 전동기의 기동 및 정지를 시행할 경우에 전동기는 썬지의 영향으로 충격을 받게 된다. 이러한 충격에 견딜수 있도록 전동기의 절연이 설계되어야 하며[5], 그 기준은 IEEE Guide "교류 회전기의 성형 고정자 코일의 권선간 절연 시험"의

Standard 522-1992에 기초한다.

전동기는 식 (1)에 나타나 있는 차단기에 의한 충격파의 파두장에 따른 충격 전압의 크기가 V_1, V_2, V_3, V_4 의 경우에 대해 견딜 수 있도록 설계되어야 한다. 어떠한 경우에도 전동기 단자에서의 썬지는 전동기 임펄스 내용량 보다 낮아야 한다[6]

$$\begin{aligned}
 V_L &= \text{Machine Voltage, kV} \\
 V_1 &= (\sqrt{2}/\sqrt{3}) V_L \text{ at } 0.0\mu\text{s} \\
 V_2 &= 3.5 V_1 \text{ at } 0.1\mu\text{s} \\
 V_3 &= 5V_1 \text{ at } \geq 1.2\mu\text{s} \\
 V_4 &= 6.5V_1 \text{ at } \geq 2\mu\text{s}
 \end{aligned} \tag{1}$$

2.2 썬지 해석을 위한 배전계통 모델링

진공차단기의 스위칭 썬지를 해석하기 위하여, 그림 1과 같이 시뮬레이션 회로를 구성하였다.

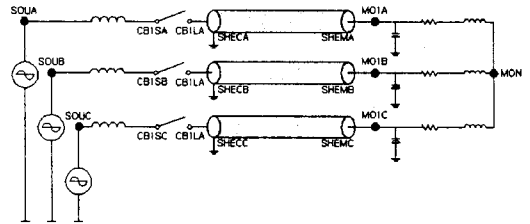


그림 1. 시뮬레이션 회로

2.2.1 전압원과 전원 임피던스

전원은 13.8kV와 4.16kV계통의 경우로 나누었고, 전원의 임피던스는 단락용량 1000MVA을 기준으로 계산하였다. 2차측에서 단락용량으로부터 구한 단락전류는 식 (2),(3)와 같이 계산된다.

$$\text{단락용량 MVA} = \sqrt{3} \times (\text{nominal kV}) \times |I_{sc}| \tag{2}$$

$$|I_{sc}| = \frac{1000}{\sqrt{3} \times 13.8} = 41 [kA] \tag{3}$$

따라서, 대지에 대한 선로의 임피던스는 식 (4)과 같다.

$$Z_{sc} = \frac{V_{scL-N}}{I_{sc}} = \frac{V_{scL-L}}{\sqrt{3} \times I_{sc}} = \frac{(V_{scL-L})^2}{\text{단락용량 MVA}} = 0.19 [\Omega] \tag{4}$$

4.16kV 계통의 경우, 같은 방법으로 계산하면 전원의 임피던스는 식 (5)와 같다.

$$Z_{sc} = \frac{(4.16)^2}{1000} = 0.0173[\Omega] \quad (5)$$

2.2.2 진공차단기

진공차단기 모델은 여러 가지 다양하고 복잡한 모델이 발표되어 있으나 본 논문에서는 시뮬레이션을 위해 간략화된 모델을 사용하였다. 전동기의 기동을 위한 진공차단기의 투입은 EMTP내의 보통 스위치를 Close하는 것으로 모의하였으며, 차단기 개방시에 발생하는 재점호 현상은 차단기의 부하측에 4[pu]의 전압이 충전되어 있을 때 전원이 -1[pu]에서 재점호하는 것으로 모의하였다.

2.2.3 케이블

EMTP에서 케이블은 분포정수회로로 모델링된다. 이 분포정수를 계산하기 위하여 EMTP내의 정수계산 SUBROUTINE인 CABLE CONSTANTS를 사용하였다[4]. 케이블의 접지상태는 전원측만이 접지되어 있는 것으로 하였으며, 지표에서 12feet의 높이로 트레이에 3상이 인접하여 부설되어 있는 것으로 가정하였다.

2.2.4 유도전동기

3상 유도전동기는 저항과 인덕턴스가 직렬로 연결되고 각상에서 대지에 대한 정전용량을 고려한 모델로 하였다. 전동기의 권선은 비접지인 것으로 하고 Y결선된 것으로 하여 시뮬레이션하였다. 전동기의 대지에 대한 정전용량 값은 실측치를 기준으로 하였다.

표 1. 유도전동기의 상세 데이터와 케이블 타입

구분	Description	Motor	R[Ω]	L[mH]	C[μF]	Cable type
A	Reactor Coolant Pump 1A	13200V 8800HP	0.79	9.65	0.094	0175HTS8 0175HRS8
B	Circulating Water Pump A	13200V 1743HP	5.0	70.0	0.036	0340HRS8
C	Condensate Pump	13200V 3620HP	1.392	17.0	0.056	0340HRS8
D	TBCCW Pump	4000V 800HP	7.2	90.0	0.014	0340MRS8
E	Air Compressor	4000V 500HP	8.0	98.0	0.010	0340MRS8
F	LPSI Pump #1	4000V 600HP	7.8	95.0	0.011	0340MAS8
G	HPSI Pump #1	4000V 1000HP	6.96	85.0	0.016	0340MAS8

2.3 변압기가 있는 경우 써지 검토

피보호기기 중 변압기를 보호하기 위해서는 배전반과 변압기의 거리등을 고려하여 피뢰기 설치여부를 검토하여야 한다. 고압폐쇄배전반에 설치되어야 할 써지어레스터 선정에 대해 그림 2에 제시된 경우에 대해 검토하였다.

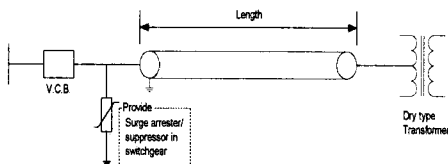


그림 2. 건식변압기 적용시 보호대책

2.3.1 13.8kV 계통

13.8kV계통의 Dry type Transformer에 대한 요구 임펄스 레벨은 95kV BIL이므로, 그림 3[IEEE Std.

141-1996]에 나타난 바와 같이 케이블 길이가 150ft 이상인 경우에 써지어레스터 최대방전전압은 43kV가 요구된다. 13.8kV 계통에 사용된 변압기까지의 케이블 길이는 139.8ft, 470.7ft, 2585.2ft 이므로, 상기와 같은 정격(최대방전전압=43kV)이 요구된다고 할 수 있다.

① 정격전압 10kV S/A

이 피뢰기를 배전반의 부하측에 설치할 경우에 표 2에 나타난 특성값에 따르면, 10kA에 대한 최대방전전압은 32kV이다. 따라서, 10kV S/A를 설치하였을 때의 최대방전전압 마진은 다음과 같다.

$$MDV_{margin} = \frac{43 - 32}{43} \times 100 = 25.58[\%]$$

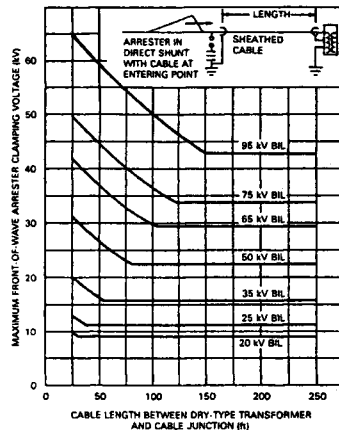
② 정격전압 18kV S/A

표 2에 나타난 특성값에 따르면, 10kA에 대한 최대방전전압은 57.5kV이다. 따라서, 18kV S/A를 설치하였을 때의 최대방전전압 마진은 다음과 같다.

$$MDV_{margin} = \frac{43 - 57.5}{43} \times 100 = -33.72[\%]$$

즉, 18kV S/A를 사용할 경우 43kV보다 14.5kV높은 57.5kV의 최대방전전압을 전파하게 되어 후단의 Dry type Transformer가 전압 스트레스를 받게 된다.

따라서, 13.8kV계통에 대해서는 변압기 보호를 위해 10kV S/A가 바람직하다. 하지만, 13.8kV계통의 경우 상당전압은 7.97kV이므로, 10kV S/A의 연속정격(MCOV) 8.4kV에 대해 어레스터 자체 보호에 문제가 있을 수 있으므로 이를 종합적으로 고려하여 선정하여야 한다.



Note: Interpolate or extrapolate for BIL's not shown.

그림 3. 변압기 설치 거리에 따른 절연레벨

표 3. DynaVar PDV-100 Electrical Characteristics

정격 전압	MCOV kV	0.5 μ sec 10kA Maximum IR-kV	500A Switching Surge Maximum IR-kV	8/20 Maximum Discharge Voltage kV					
				1.5kA	3kA	5kA	10kA	20kA	40kA
3	2.55	12.5	8.0	9.5	10.0	10.5	11.0	13.0	15.3
6	5.1	25.0	16.0	19.0	20.0	21.0	22.0	26.0	30.5
10	8.4	36.5	23.5	26.0	28.0	29.5	32.0	37.5	43.5
18	15.3	65.0	42.1	46.0	49.1	52.0	57.5	65.4	76.9

2.3.2 4.16kV 계통

4.16kV계통의 전동기 전단 Dry type Transformer에 대한 요구 임펄스 레벨은 60kV BIL이므로, 그림 3[IEEE Std. 141-1996]에 나타난 바와 같이 케이블 길이가 80ft 이상인 경우에 써지어레스터 최대방전전압은 27kV가 요구된다. 4.16kV 계통에 사용된 변압기까지의 케이블 길이는 119ft, 550ft, 2928.6ft 이므로, 상기와 같은 정격(최대방전전압=27kV)이 요구된다고 할 수 있다.

① 정격전압 3kV S/A

표 2에 나타난 특성값에 따르면, 10kA에 대한 최대방전전압은 11kV이다. 따라서, 3kV S/A를 설치하였을 때의 최대방전전압 마진은 다음과 같다.

$$MDV_{margin} = \frac{27-11}{27} \times 100 = 59.26[\%]$$

② 정격전압 6kV S/A

표 2에 나타난 특성값에 따르면, 10kA에 대한 최대방전전압은 22kV이다 따라서, 6kV S/A를 설치하였을 때의 최대방전전압 마진은 다음과 같다.

$$MDV_{margin} = \frac{27-22}{27} \times 100 = 18.5[\%]$$

즉, 6kV S/A를 사용할 경우 27kV보다 5kV 낮은 22kV의 최대방전전압을 전파하게 되어 3kV S/A에 비해 마진이 낮다.

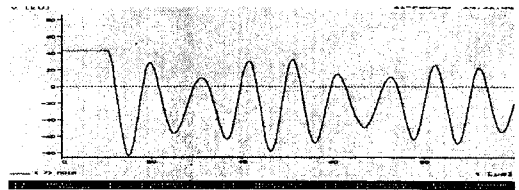
따라서, 4.16kV계통에 대해서는 변압기 보호를 위해 3kV S/A와 6kV S/A가 모두 가능하지만, 최대방전전압의 마진 측면에서 보면 3kV S/A가 바람직하다. 하지만, 4.16kV계통의 경우 상당전압은 2.40kV이므로, 3kV S/A의 연속정격(MCOV) 2.55kV에 대해 어레스터 자체 보호에 문제가 있을 수 있으므로 이를 종합적으로 고려하여 선정하여야 할 것이다.

2.4 시뮬레이션 회로와 결과

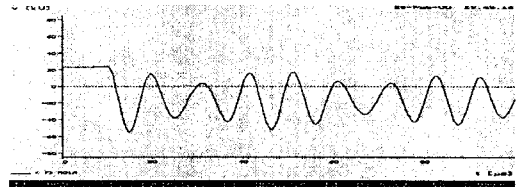
시뮬레이션을 위해 표 1에 나타나 있는 유도전동기의 등가 R, L, C의 값과 사용된 케이블 타입의 상세 데이터를 사용하였다. 진공차단기 썬지 과전압중에서 가장 가혹한 경우에 대한 검토로서 재점호현상을 150, 200, 300, 500, 800 feet의 케이블 길이에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, 그 결과를 IEEE Standard 522-1992의 유도전동기의 임펄스 능력과 비교하고, 이를 위반하는 경우 썬지 어레스터를 진공차단기가 설치된 배전반의 부하측에 설치하여 썬지 억제 효과를 보였다(표4). 그림 4에서 A200R Case의 재투입 썬지를 나타내었고, 이 경우에 대해 유도전동기 전단에 썬지 어레스터를 설치하였을 경우 썬지가 효과적으로 억제됨을 검증하였다.

표 4.진공차단기 재점호시의 재투입썬지와 썬지억제대책을 실시하였을 경우의 재투입썬지

전압 [V]	Case	Cable Length	써지어레스터 투입전		IEEE Std. OK?	써지어레스터 투입후		IEEE Std. OK?
			[kV]	[pu]		[kV]	[pu]	
13200	A200R	200 ft	83.63	7.76	n	55.11	5.11	y
	A500R	500 ft	82.10	7.62	n	54.15	5.02	y
	B200R	200 ft	67.43	6.26	y	46.47	4.31	y
	B800R	800 ft	67.00	6.22	y	46.17	4.28	y
	C150R	150 ft	76.94	7.14	n	51.68	4.80	y
	C800R	800 ft	74.76	6.94	n	50.26	4.66	y
4000	D200R	200 ft	19.09	5.85	y	14.18	4.34	y
	D500R	500 ft	22.79	6.98	n	16.73	5.12	y
	E200R	200 ft	20.22	6.19	y	14.96	4.58	y
	E800R	800 ft	23.38	7.16	n	17.13	5.24	y
	F150R	150 ft	19.56	5.99	y	14.50	4.44	y
	F800R	800 ft	24.94	7.64	n	18.21	5.58	y
	G300R	300 ft	19.29	5.91	y	14.32	4.38	y
	G800R	800 ft	21.38	6.55	n	15.75	4.82	y



(a) A200R Case(without Surge Arrester)



(b) A200R Case(with Surge Arrester)

그림 4. A200R Case의 전동기 전단 전압

3. 결 론

본 논문에서는 다양한 유도전동기 기동 정지 시에 진공차단기의 적용 시에 발생하는 썬지에 대한 해석을 실시하였다. 썬지 해석에 필요한 데이터는 울진 원자력 발전소 5.6호기의 실계통 데이터를 사용하였으며, 유도전동기의 기동을 위한 진공차단기의 투입시 발생하는 투입 썬지와 차단시 발생하는 재점호의 경우에 발생하는 재투입 썬지로 나누어, 가장 가혹한 조건을 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

그 결과, 진공차단기 투입시는 전압의 절대치가 위험한 수준으로 올라가는 경우가 없었으나, 재점호시에는 썬지 억제 대책을 실시하지 않을 경우는 35경우중 18경우가 IEEE Standard 522-1992 규정을 초과하는 6.5[pu]이상의 과전압이 발생했다. 따라서, 이러한 경우에 적절한 썬지 억제대책이 필요한데, 본 논문에서는 배전반의 차단기 부하측에 설치하여 IEEE 기준인 6.5[pu]이하로 재투입 썬지를 억제할 수 있다는 것을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 또한, 전동기 전단에

서지어레스터를 설치하는 경우, 최대 3[pu]의 썬지가 발생함을 확인하였다. 따라서, 가능하면 전동기 전단에 썬지 억제장치를 설치함이 요구된다.

또한 배전계통에 변압기가 있을 경우에 대하여 IEEE Std. 141-1996에 근거하여 썬지 어레스터 설치시의 여유도를 계산하여, 필요 썬지 어레스터에 대한 고찰을 하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Power circuit breaker theory and design, *IEEE Power Engineering Series1, Chapter8, P356-P389*
- [2] 진공차단기 스위칭 썬지에 의한 전동기 권선 스트레스 해석, 김 중겸, *충남대학교 대학원 박사학위 논문*
- [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. EC, Vol. 1, No. 1, pp 130-137, March 1986.*
- [4] ATP Rule Book, ATP Salford version of EMTP.
- [5] 급준파 썬지와 GIS의 절연문제, *일본전기학회 기술보고, 1990년 2월*
- [6] "Testing Turn-to-Turn Insulation on Form-Wound Stator Coils for Alternating Current Rotating Electric Machines", *IEEE Standard 522-1992*