

22.9 kV-y 실공장 배전선로 모의를 위한 집중정수회로의 설계

윤철호, 정영호, 한용희
한전 전력연구원

The Design of Lumped Constant Circuit for the Simulation of A Real 22.9 kV-y Distribution Line

Chul-ho Yun, Yeong-ho Jeong, Yong-huei Han
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - When we perform the test related to the power distribution system such as artificial fault test, protective coordination test, distribution automation test in short length test line, Lumped Constant Circuit, a kind of variable impedance, should be attached to the test line in order to make it equivalent to a real line in length electrically.

In this paper we designed the positive sequence and zero sequence Lumped Constant Circuit with optimized inductor and resistor for the modification of long, 16km, distribution line, when they are attached to the short, 4km, distribution test line.

1. 서 론

한전 전력연구원에서 고장 배전실증시험장내에 건설중인 배전시험선로는 비교적 공장이 짧기 때문에 실선로의 단위길이당 분포정수를 집중정수로 표현한 집중정수회로를 시험선로에 부가하여 장거리선로의 특성을 모의하여야 한다. 이 집중정수회로는 적절한 길이단위로 가변이 가능하고 또한 쉽게 시험선로에 연결, 분리할 수 있도록 설치하는 것이 중요하며, 실 선로에 설치하여 계성능을 충분한 발휘하여야 한다. 집중정수회로는 정상임피던스 회로용 저항과 인덕턴스 1 Set, 영상임피던스 회로용 저항과 인덕턴스 1 Set로 구성하였고, 각 소자당 임피던스용량, 형상, 재질, 소요량 등에 대해 다음과 같이 설계하였다.

2. 본 론

2.1 기준 임피던스 선정

배전실증시험장에 설치하는 배전시험선로의 선종은 A L-OC 160mm² 및 95mm²의 2종류이며, 선로정수는 전선의 규격과 장구형태에 따라 다르기 때문에 집중정수회로도 여기에 맞추어 가변할 수 있도록 설계하였다. 일반적으로 직접 다중접지식 배전계통에서는 선로 고장시 정전용량(C)의 영향이 크지않으므로 정전용량을 무시할 수 있으나 지락고장시에는 고장전류가 크기 때문에 영상 임

표 1. 가공선로 임피던스

전선규격 (전력선-중성선)	ACSR 160-95 mm ²		ACSR 95-95 mm ²		
	R	X	R	X	
임피던스					
정 상	%Z / km	3.47	7.46	5.8	8.41
	Ω / km	0.182	0.391	0.304	0.44
	mH / km	-	1.037	-	1.167
영 상	%Z / km	11.99	29.26	13.5	30.85
	Ω / km	0.629	1.534	0.708	1.618
	mH / km	-	4.069	-	4.29

피던스 L₁과 영상회로의 R₀, L₀ 등으로 구성되며, 이들의 값은 잘 고려해야 한다. 따라서 집중정수 소자는 각 상별 R₁, 2,400mm² 완금 수평장주일 경우 다음 [표 1]과 같다. 또한 집중정수회로가 모의하고자하는 배전선로 공장은 16km로 정하였으며, 이는 변전소에서 배전실증시험장까지의 배전선로 공장과 시험장내 선로 공장 및 집중정수 모의공장을 합할 경우 배전선로의 평균공장인 30km 배전선로를 모의하도록 하기 위함이다. 때문이다. 또한 집중정수의 기본 단위거리를 4km로 정하여 4, 8, 12, 16km의 단계로 정수치를 변화하도록 제작하여 다양한 시험조건을 정할 수 있도록 하였다.

2.2 Inductance 회로 설계

집중정수회로의 Inductance 소자는 큰 고장전류가 흐를때에도 인덕턴스값이 변하지 않아야 하므로 공심 코일을 사용하여야 한다. 이에 따라 Coil의 크기가 커지고 누설자속이 증가하여 상호유도에 의한 인접 코일과의 간섭으로 정수치의 변화를 수반할 수 있으므로 코일의 모양과 배치, 위치조정 등에 세심한 주의를 요하며, 구조적으로는 고장전류 통과시 생기는 큰 전자기계력에 견딜 수 있도록 제작되어야 한다. 이러한 관점에서 코일의 형상에 대하여 다각도로 검토하였으며, 최종적으로 Pan-cake Lapping 형으로 결정하였다. 이것은 동대를 나선형으로 감은 Pan-cake 모양의 코일을 적층한 구조로서 권선밀도가 높기 때문에 Compact화 할 수 있고, 제작공정도 비교적 간단하며, 권선모양이 정원형이므로 전자기계력에 대한 대비도 쉽게 할 수 있는 이점이 있다. 코일의 최적 설계는 우선 예상 최대고장전류를 소정의 시간 동안 흘렸을 때 이상이 생기지 않도록 코일 도체의 굵기(단면적)를 결정하고, 여기에 맞추어 동대의 size(두께와 폭)를 결정하며, 이를 바탕으로 열의 발산, 재료의 가공성, 전자기계력에 대한 내력 등을 고려하여 적절한 전체 코일의 체적, 권선간격, 층간격을 선정하도록 하였다. 또한 동대는 가능한 한 기계적 강도가 높은 경동계품을 선택하였다.

2.2.1 고장전류의 계산

고장전류가 흐르는 동안 정상 Impedance(이하 Imp로 표기) 회로의 코일은 집중정수회로가 삽입되는 지점에서의 최대고장전류(3상 단락전류)에 견딜 수 있어야 하고, 영상 Imp 회로의 코일은 그 지점의 최대 1선 지락전류에 견딜 수 있어야 하며, 고장전류의 지속시간은 Feeder의 최대부하전류를 참고하여 설정한 과전류 계전기의 정정치에 따라 결정된다.

① 3상단락 고장전류 계산

$$I_{3s} = \frac{100}{Z_1} \times I_b \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

$$Z_1 = Z_{S1} + Z_1 + Z_{L1} + Z_{C1} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

Z₁ : 정상 % Imp

- Z_{S1} : 변전소 모선 전원측 정상 % Imp
- Z_t : 주변압기(100MVA 환산) % Imp
- Z_{L1} : 변전소-집중정수회로간 정상 % Imp
- Z_{C1} : 집중정수회로 정상 % Imp의 최솟치

따라서 3상단락 고장전류는 다음과 같이 계산된다.

$$I_{3S} = \frac{100 \times 2521.2}{2.66 + (3.47 \times 6) + j(13.4 + 33.3 + (7.46 \times 6))} = 2,670 \text{ [A]}$$

② 1선지락 최대고장전류 (Rf=0 일 때)

$$I_g = 3 \times \frac{100 \times I_b}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3R_f} \quad \dots\dots (2.3)$$

- Z₁(Z₂) : 역상 % Imp
- Z₀ : 영상 % Imp = Z_t + Z_{S0} + Z_{L0} + Z_{C0}
- Z_{S0} : 계통의 영상 % Imp
- Z_{L0} : 변전소-집중정수회로간 영상 % Imp
- Z_{C0} : 집중정수회로 영상 % Imp의 최솟치

따라서 1선지락 최대 고장전류는 다음과 같다.

$$I_g = \frac{300 \times 2521.2}{(23.48 \times 2) + 78.4 + j(91.5 \times 2) + 241.7} = 1,708 \text{ [A]}$$

과전류 계전기(OCR)는 Feeder 표준부하에 맞추어 정정된 것으로 보고 고장지속시간을 구한다. 반한시성 OCR의 T-C 곡선에서 Time dial을 중간값인 5에 놓았을 때 3상 단락전류 2,670 A(배수 6.36)에서의 동작시간은 0.92초이고 1선지락전류 1,708 A(배수 4.07)에서는 1.7초이다. 여기에 차단기 동작시간, 여유시간 및 안전율을 고려하여 고장지속시간을 2초로 선정한다.

2.2.2 인덕턴스회로 규격 선정

코일선의 허용전류는 온도상승에 의하여 결정되고 이 온도상승은 저항손에 의하여 Coil 내부에서 발생하는 열과 복사 및 대류 등으로 외부에 발산되는 열에 의하여 결정되는데, 통전시간 2초 이하의 단시간 정격은 외부로 발산되는 열을 무시하고 발생열이 모두 내부에 축적되는 것으로 보고 계산한다. KS-C4309(변압기 단락강도 시험방법)에 의하여 권선의 온도에 따른 정상분 전류에 의한 전류밀도 J₁를 계산하면,

$$J_1 = \sqrt{\frac{\theta_1 - \theta_0}{a \times t \times 10^{-3}}} = 94.03 \text{ [A/mm}^2] \quad \dots\dots (2.4)$$

- θ₁ : 권선의 최고 평균온도 (250℃)
- θ₀ : 상시 허용 최고온도 (105℃)
- a : 재질과 온도에 따라 정해지는 상수 (8.2)
- t : 단락시간 (초)

따라서 정상 Imp. 회로 코일 도체의 단면적 S₁은

$$S_1 = \frac{I_{3S}}{J_1} = \frac{2,670}{94.03} = 28.4 \text{ [mm}^2] \quad \dots\dots (2.5)$$

이며, 영상 Imp. 회로의 단면적은 다음과 같이 된다.

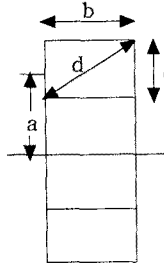
$$S_0 = \frac{I_g}{J_0} = \frac{1,708}{94.03} = 18.2 \text{ [mm}^2] \quad \dots\dots (2.6)$$

S₁, S₀의 값이 정해짐에 따라 다음과 같이 동대 규격을 선정한다.

- 정상 Imp 회로용 : 2.0×15 mm
- 영상 Imp 회로용 : 2.0×10 mm

이와 같이 선정된 동대 규격을 기초로 식 (2.7)에 의해 인덕턴스회로의 제원을 계산하면, [표 2]과 같이 된다.

$$L = 10^{-7} \times 4\pi N^2 \left\{ \left(1 + \frac{b^2}{32a^2} + \frac{c^2}{96a^2} \right) \ln \frac{8a}{d} - y_1 + \frac{b^2}{16a^2} y_2 \right\} \quad \dots\dots (2.7)$$



- 여기서
- a : 평균반경
- b : 축 방향의 길이
- c : 반경방향의 두께
- d : $= \sqrt{b^2 + c^2}$
- N : 총 권수
- y₁, y₂, y₃ 는 c/b의 함수

그림 1. 다층원통형 코일

표 2. 인덕턴스 회로 설계 제원

	층수 (층)	총 권수 (회)	내경 (m)	외경 (m)	축방향 길이 (m)	동대 길이 (m)	동대 무게 (kg)	인덕턴스 (mH)	비고
정상회로	8	224	0.284	0.968	0.335	441	132.3	18.7	1상 16Km
영상회로	10	260	0.260	0.896	0.320	472	100.8	22.9	16km

2.2 저항 회로 설계

2.2.1 저항소자의 단면적 계산

회로의 단락, 지락 등의 고장전류가 흐르는 시간이 2초 이하로 짧은 경우 온도체 이외의 경우에는 다음 식에 의해 단면적을 계산한다.

$$A = \frac{I^2 \rho t}{4.186 C \cdot \ln \frac{\frac{1}{a} - 20 + \theta_1}{\frac{1}{a} - 20 + \theta_0}} \text{ [cm}^2] \quad \dots (2.8)$$

- C : 도체의 비열 [cal/℃·cm³]
- A : 도체의 단면적 [cm²]
- I : 단락시 허용전류 [A]
- a : 20℃에서의 저항온도계수
- ρ : 20℃에서의 고유저항 [Ω·cm]
- t : 통전시간 [초]
- θ₁ : 통전시 허용온도 [℃]
- θ₀ : 초기온도 [℃]

① 정상회로의 도체단면적 계산

정상회로의 도체단면적을 Kanthal 소재를 적용하여 식(2.8)에서 구하면 다음과 같다.

$$A_1 = \frac{2670^2 \times 6 \times 10^{-5} \times 145 \times 10^{-6} \times 1.07}{4.186 \times 1.1 \cdot \ln \frac{1}{\frac{6 \times 10^{-5}}{6 \times 10^{-5}} - 20 + 800}} = 0.352 \text{ [cm}^2\text{]} \dots\dots\dots (2.9)$$

따라서 정상회로용 도체의 단면적은 35.2[mm²]이다.

② 영상회로의 도체 단면적 계산

영상회로에 있어서는 I=1708 [A], t=1.85 [초]이고 정상회로와 같은 온도조건에서 식(2.10)과 같이 계산한다.

$$A_0 = \frac{1708^2 \times 6 \times 10^{-5} \times 145 \times 10^{-6} \times 1.85}{4.186 \times 1.1 \cdot \ln \frac{1}{\frac{6 \times 10^{-5}}{6 \times 10^{-5}} - 20 + 800}} = 0.249 \text{ [cm}^2\text{]} \dots\dots\dots (2.10)$$

따라서 영상회로용 도체 단면적은 24.9[mm²]이다. 그러나 저항재료는 동대와는 달리 제품이 규격화되어 생산되며 임의의 단면적으로 가공이 곤란하므로 계산값에 근사한 규격의 상품을 선택하여 제작한다.

정상 Imp 회로용 : 2.0×20 mm
영상 Imp 회로용 : 2.0×15 mm

2.2.2 저항회로 규격 선정

앞서 제시한 바와 같이 저항회로를 4km 단위로 가감할 수 있도록 하기 위하여 8km의 저항회로를 3개(1상당) 제작하였으며, 제작된 각 저항회로를 직·병렬 접속하여 4, 8, 12, 16km를 표현할 수 있게 하였다. 저항선의 길이를 구하기 위해 우선 저항선으로 선정된 Kanthal 소자의 온도 특성에 따른 고유저항을 식(2.11)와 같이 구한다. 여기서 평균사용온도는 400℃로 잡는다.

$$\rho = 145(1 + (\alpha \times 400)) = 145(1 + 0.00006 \times 400) = 148.48 \text{ [}\mu\Omega\text{.cm]} \dots\dots\dots (2.11)$$

또한 ACSR 160mm² 선로의 정상회로 8km의 저항은 다음과 같다.

$$r_1 = 0.182 \times 8 = 1.456 \text{ [}\Omega\text{]} \dots\dots\dots (2.12)$$

ACSR 95mm² 선로로 환산하면 1.456/0.304 = 4.8 km에 상당하여 ACSR 95mm² 회선의 가변단위는 4.8 km로 선정한다. Kanthal 2.0×20mm를 사용할 경우 저항선의 길이 ℓ₁는 다음과 같이 산출할 수 있다.

$$\ell_1 = r_1 \cdot A_1 / \rho$$

$$\ell_1 = 1.456 \times 40 / 1.4848 = 39.2 \text{ [m]} \dots\dots (2.13)$$

또한 저항선의 무게 w₁는 다음과 같이 계산된다.

$$w_1 = 7.1 \times 40 \times 39.2 \times 10^{-3} = 11.2 \text{ [kg]} \dots\dots (2.14)$$

ACSR 160mm² 회선 영상회로 8km의 저항은

$$r_0 = 0.629 \times 8 / 3 \approx 1.677 \text{ [}\Omega\text{]} \dots\dots (2.15)$$

ACSR 95mm² 회선의 영상회로 4.8km의 저항은

$$r_0 = 0.708 \times 4.8 / 3 = 1.133 \text{ [}\Omega\text{]} \dots\dots (2.16)$$

이다. 따라서 ACSR 95mm² 회선의 영상회로도 정상회로와 같이 4.8km 단위로 가변하기 위하여는 1.133Ω 되는 지점에 Tap을 설치하여야 한다. Kanthal 1.5×15mm를 사용할 경우 저항선의 길이와 무게는 각각 다음과 같이 된다.

$$\ell_1 = 1.677 \times 22.5 / 1.4848 = 25.4 \text{ [m]} \dots\dots (2.17)$$

$$w_0 = 7.1 \times 22.5 \times 25.4 \times 10^{-3} = 4.6 \text{ [kg]} \dots\dots (2.18)$$

2.3 집중정수회로의 설치 및 결선

집중정수회로의 설치 위치는 변전소에서 온 전용배전선로와 시험장내 시험선로의 경계점에 설치하여 집중정수의 투입, 개방이 용이하도록 설계하였다. 또한 인덕턴스 회로의 정수치 설정은 Jumper 선을 해당 탭 단자에 직접 연결하는 방법으로 행하며, 저항회로는 5개의 소형 DS를 [그림2]와 같이 배열하여 직·병렬 연결함으로써 4km 단위의 저항값을 변환할 수 있도록 하였다. 정상회로는 3상에 각 각 집중정수회로를 연결하였으며, 영상회로는 중성선을 1개의 영상회로에 연결하여 영상회로를 제어할 수 있도록 하였다.

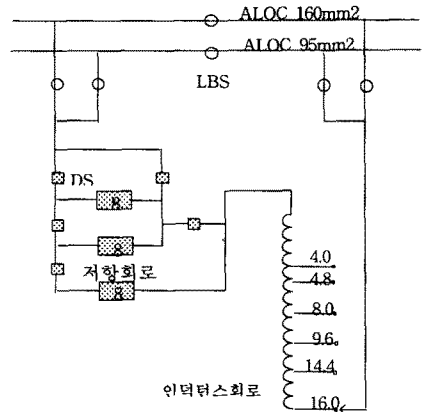


그림2. 배전용 집중정수회로 결선도

3. 결 론

본 논문을 통하여 22.9kV-y 실증장 배전선로를 모의하기 위한 배전선로용 집중정수회로의 임피던스용량, 형상, 재질, 소요량 및 결선 등에 대해 설계하였다. 향후 집중정수회로를 제작하여 실 선로에 설치함으로써 단위 시험선로의 단점을 극복하고 장거리선로의 특성을 모의할 수 있으며, 인공고장시험시 고장전류를 억제하여 변전소계통에 영향을 최소화하는 등 역할을 담당할 것으로 예상된다. 또한 4, 8, 12, 16km 단위로 선로 공장을 가변시킬 수 있어 거리변화에 따른 배전자동화시험, 인공고장시험 등을 수행할 수 있어 활용성은 더욱 증대될 전망이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 한전 품질보증실, "설계기준(배전분야)", 1997
- [2] 전력연구원, "22.9kV 배전실증시험장 건설에 관한 연구 (2)" 중간보고서, p39-57, 1997
- [3] 전력연구원, "22.9kV 배전실증시험장 건설에 관한 연구 (2)" 중간보고서, p20-27, 1999