

고다상(HPO) 송전 기술

-전기적 특성을 중심으로-

이 병 하*, 권 테 원**

(* 시립 인천대학교 공과대학 전기공학과 교수

** 한전기술연구원 부처장)

1. 서 론

새로운 송전선로를 건설하는 일은 환경문제, 전력설비에 대한 혐오감, 송전선로 부지확보문제, 지역이기주의 확산에 의한 주민합의의 어려움 등으로 점차 어려워져 가고있는 상황이다.

또 최근 산업의 고도화, 선진국 진입을 앞두고 있는 생활수준의 향상 등으로 전력소비가 지속적으로 증가해 가고있는 상황이어서 유통전력이 전력계통의 설비의 용량 한계에 접근해 가고 있다.

1인당 사용전력량이 1993년말 현재 2,899 KWH/인 으로서 미국, 캐나다 등에 비해 1/5, 일본, 프랑스 등에 비해서도 절반이하 수준으로 선진국에 비해 상당히 낮은 수준이므로 앞으로도 전력수요는 지속적으로 늘어나, 1994년 7월 2,670만 KW에 달한 최대전력수요가 2001년에 3,800만 KW, 2010년에 5,600만 KW 정도로 늘어날 것으로 예상되고 있다.

따라서 송전망 확충과 병행하여 기존선로를 최대한으로 활용하는 문제가 대두되어 왔고, 동일한 송전선로 확보공간을 보다 효율적으로 사용하여 전력전송을 극대화하기 위한 연구가 추진되어 왔다.

그 대책으로서 송전전압 격상을 추진하고 있고, 신 전력전송기술의 하나로 FACTS가 연구되고 있음과 아울러, 기존 송전시스템을 그대로 활용하면서 근본적인 전력전송을 증대시키는 방안으로 고다상 송전 (High Phase Order (HPO) Transmission)에 관한 연구가 10여년 전부터 미국을 중심으로 추진되어 왔으며, New York State Electric and Gas Corporation사는 최근 실제계통인 115KV Goudey-Oakdale 송전선로에 6상 송전을 시험 적용하기에 이르렀다.

여러가지 제약조건으로 해서 최대한으로 송전능력을 향상시켜야 하는 시대적 요청에 부응하여, 미국 PTI사가 주도적으로 행한 연구결과를 중심으로 고다상 송전기술에 대하여 기술한다.

2. 고다상 송전 일반사항

2.1 송전 매개체에서의 전력표현

유전체에서 표현된 전력은 아래와 같이 Poynting Vector S로 나타내어 진다.

$$S = E \times H \quad [W/cm^2] \quad (1)$$

여기서 E는 전계세기[V/cm], H는 자계의 세기[A/cm²]이다.

막스웰방정식에 의해 E와 H는 송전 매개체의 고유임피던스 Zi와 관계가 있기 때문에 Poynting Vector의 크기는

$$|S| = \frac{|E|^2}{Z_i} \quad (2)$$

선로가 통과하는 전 단면적에 대해 Poynting Vector를 적분한 것이 선로단에서 측정된 전력과 같아야 한다.

$$VI^* = \iint S \, dx \, dy \quad (3)$$

공기에 대한 고유임피던스는 Zi = 377 [Ω], 공기의절연과괴로 제한받는 전계세기는 근사적으로 E ≈ 30[KV/cm]이며, 이 제한값으로 계산하면 근사적으로 12,200[MW/m²]의 전력밀도가 산출된다. 전형적인 3상선로상에서 도체주변 필드에 저장된 에너지의 95% 이상이 상도체 중심으로부터 상간 공간의 5%에 해당하는 반경이내에 포함된다. 도체배치의 근본적 변화나 상수의 변화없이 송전선로 공간이용의 효율성의 개선은 불가능하다.

상수가 증가할때 공간위치도와 전압위상도가 일치하도

록 원형 배열로 배치하면, 공기절연체의 이용의 효율성은 근사적으로 상수에 비례한다. 보다 더 재래적인 도체 배열의 방식에 대해서까지도, 공간이용의 주목할 만한 개선이 가능하다. 그림 1이 같은 열용량을 갖는 회로차 단기를 가정할 때, 재래적인 3상 구조에 비해 콤팩트한 6상, 12상의 개념적인 구조를 보여준다.

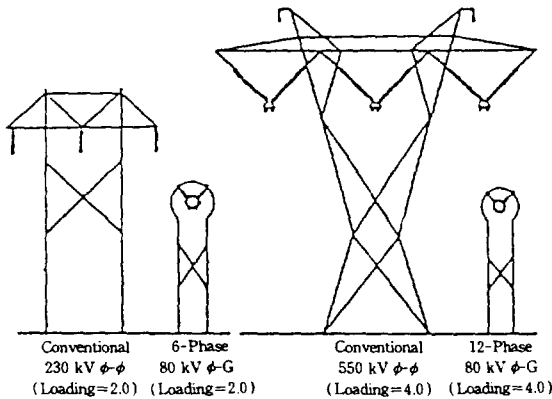


그림 1. 일반송전선로와 고다상송전선로 구조물의 예

2.2 계통전압 정의

다상에 대한 계통전압의 여러 가능한 정의가 있다. 인접 선간전압의 관계가 상수의 함수로서 변하기 때문에, 현재 선간전압으로 통용되는 전력계통전압의 용어는 재평가되어야 된다. 6상 이상에서는 상전압이 선간전압을 초과한다. 그래서, 선간전압으로 정의된 계통전압이 절연특성이나 송전능력을 반영하지 못한다. 상전압의 정의가 계통전압을 나타낼 때 덜 사용되는 용어이지만, 이 양이 고다상회로에서는 절연 요구나 전력용량의 인식과 관련해서 보다 적합한 용어이다. 참고로, 표1에 여러 상전압에 따른 3, 6, 12, 24상 계통의 선간전압이 보여져 있다.

표 1. 상전압과 선간전압

상전압(KV)	선간전압(인접한 상사이의 전압)			
	3상(KV)	6상(KV)	12상(KV)	24상(KV)
80	138	80	41	21
133	230	133	69	35
199	345	199	103	52
289	500	289	150	75
442	765	442	229	115

2.3 전위경도의 일반계산

그림2는 고다상계통의 계산을 위해 가정된 기하도를 보여준다. 이 그림에서 상당 단도체로서 원형으로 배치된 배열을 나타내고 있는데, 하단의 도체를 기준도체로 고려한다. 두번째 도체가 좌표[x',y']를 가지는 점 n에

보여져 있고, 도체 사이의 각도 θ 는 $360^\circ/N$ 로서 대칭적인 원형구조로 배열될 것이다. 여기서 N은 가정된 상의 수이다. 기본특성의 계산을 위해 정상분 만이 고려되며, 대지면의 효과는 무시된다.

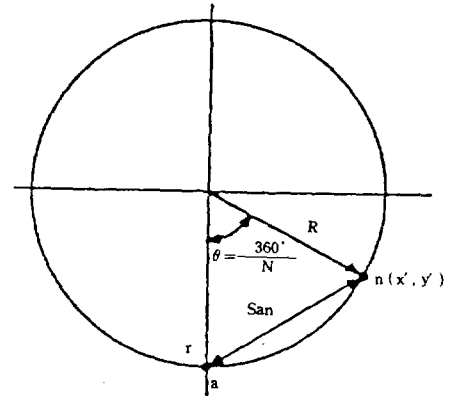


그림 2. 원주 상배열

2.3.1 전위계수

지정된 도체위나 다른 도체상의 전하에 기인한 전위는 그 원형배열의 중심으로부터, 도체표면까지 적분함으로써 계산할 수 있으며, 전위계수 행렬[P]를 구할 수 있다.

도체는 무한장이고, 원주상에 대칭으로 배열된 N상 도체에 단위길이당 대칭 N상 전압의 크기에 해당하는 $\lambda_a, \lambda_b, \dots, \lambda_n$ 의 전하가 분포되어 있다고 가정하면, 원주의 중심에서의 전위는 0이 될 것이고 a도체만에 의한 전체의 세기는

$$E_a = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\lambda_a}{r} \quad (4)$$

가 된다. 여기서 r은 도체의 반경이다.

다른 도체의 전하는 0으로 두고, a 도체에 단위길이당 λ_a 전하를 가져오면 그때 a 도체표면의 전위는

$$V_a(\lambda_a) = - \int_R^r E_a dl = \frac{\lambda_a}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{R}{r} \quad (5)$$

여기서 R은 원형으로 배열된 원주의 반경이다.

다른 도체의 전하는 0으로 두고, n 도체에 단위길이당 λ_n 전하를 가져올 때 a 도체표면의 전위는

$$V_a(\lambda_n) = - \int_R^{S_{an}} E_n dl = \frac{\lambda_n}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{R}{S_{an}} \quad (6)$$

여기서, S_{an} 은 a도체와 n도체 사이의 선분거리이다.

$$S_{an} = 2R \sin \frac{\theta}{2}$$

n도체상의 전하 λ_n 는 상배열에 의해 λ_a 와 다음과 같은 관계가 있다.

$$\lambda_n = \lambda_a \cos \theta$$

따라서, N상에 대해 반복하여 계산하고 중첩시키면,

$$V_a = \frac{\lambda_a}{2\pi\epsilon_0} \left\{ \ln \frac{R}{r} + \sum_{i=1}^{N-1} \cos \left(\frac{2\pi i}{N} \right) \ln \left(\frac{1}{2} \csc \frac{\pi i}{N} \right) \right\} \quad (7)$$

$$P_a = \ln \frac{R}{r} + \sum_{i=1}^{N-1} \cos \left(\frac{2\pi i}{N} \right) \ln \left(\frac{1}{2} \csc \frac{\pi i}{N} \right) \quad (8)$$

이식은 a상 전하와 N상 선로의 전위계수의 곱을 나타낸다.

전위계수 P_a 는 N상 원형배열의 반경 R과 도체반경 r의 비의 함수인 자기항과, 상의 수에 의해 일정하게 결정되는 상호항의 합으로 표시된다.

36상 까지 계산된 전위계수가 그림 3에 그려져 있다.

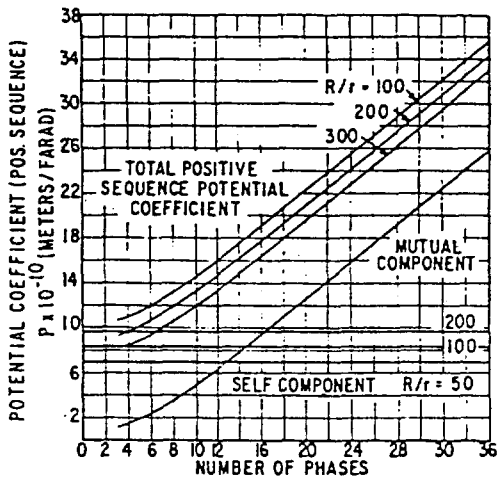


그림 3. 전위계수

매우 높은 다상배열로 갈수록 상호항의 성분이 주도적으로 영향을 미침을 알 수 있는데, 9상 이상의 다상회로에서는 전위계수가 상의 수와 비례하여 거의 선형으로 증가한다.

2.3.2 도체전위경도

반경 r의 n 도체표면에서의 전위경도는

$$E_n = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\lambda_n}{r} \quad (9)$$

그리고,

$$\lambda_n = C_n V_n = \frac{2\pi\epsilon_0}{P_n} \cdot V_n, \quad (10)$$

$$C_n = \frac{2\pi\epsilon_0}{P_n}$$

$$\text{따라서, } \frac{E_n}{V_n} = \frac{1}{rP_n} \quad (11)$$

그림4에서 다상회로에 대한 도체표면 전위경도가 3상회로의 전위경도를 기준단위로 그려져 있다. 도체의 반경이 일정할 때, 전위경도는 상수가 증가함에 따라 점진적으로 감소한다.

3. 선로임피던스

3.1 써어지 임피던스와 전력취급용량

다상의 써어지 임피던스 Z_s 는 앞에서 기술한 전위계수 P_a 및 C와 L의 관계로 부터 직접 계산할 수 있다.

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{P_a}, \quad L = \frac{\mu_0 P_a}{2\pi}$$

$$Z_s = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cdot \frac{P_a}{2\pi} \quad (12)$$

써어지 임피던스 로우딩(Surge Impedance Loading) P_s 는 상수에 직접비례하며,

$$P_s = \frac{NV^2}{Z_s} = \frac{2\pi NV^2}{P_a} \cdot \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \quad (13)$$

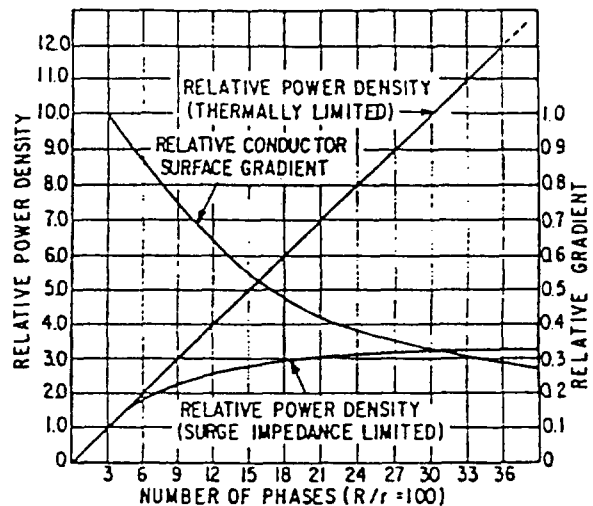


그림 4. 전위경도와 써어지임피던스/열 로우딩

그림 4에 상도체의 일반적인 원형배열에 대한 써어지

임피던스 로우딩의 상수에 따른 변화가 3상배열에 대한 써어지 임피던스 로우딩을 기준으로 한 퍼유닛값으로 보여져있다. 상수가 증가함에 따라, 써어지 임피던스는 상 사이의 상호결합으로 점진적으로 더 높아지고, 써어지 임피던스 로우딩은 점진적으로 더 낮은 율로 증가하게 된다. 6상에 대해서는 써어지 임피던스 로우딩이 상수의 증가에 근사적으로 비례한다.

물론 전력취급용량이 열로 제한을 받는 회로에 대해서는 전력취급용량이 직접 상의 수에 비례하며, 그림 4에 표시되어 있다.

3.2 시퀀스 임피던스

차폐선을 포함해서 도체배열구조의 효과를 더 자세히 조사하기 위해, 그림 5의 대표적인 80KV 상전압 6상 콤팩트 배열들에 대한 임피던스값들을 표 2에서 요약한다.

표 2. 6상선로 시퀀스 임피던스

배열	시퀀스	R(Ω/m)	Xl(Ω/m)	Xc(Ω-m)	Zs(Ω)	SIL(MW)
A	0	.670	5.31	.643	1848	115
	1	.114	.683	.160	331	
	2	.114	.515	.119	248	
	3	.114	.483	.112	233	
	4	.114	.515	.119	248	
	5	.114	.683	.160	331	
B	0	1.74	3.65	.290	1028	119
	1	.118	.682	.151	321	
	2	.114	.515	.119	248	
	3	.114	.483	.111	232	
	4	.114	.515	.119	248	
	5	.118	.682	.151	321	
C	0	1.24	4.73	.443	1448	116
	1	.115	.683	.158	329	
	2	.114	.515	.119	248	
	3	.114	.483	.112	233	
	4	.114	.515	.119	248	
	5	.115	.683	.158	329	
D	0	.670	5.35	.648	1862	121
	1	.114	.653	.153	316	
	2	.114	.523	.122	253	
	3	.114	.485	.112	233	
	4	.114	.523	.122	253	
	5	.114	.653	.153	316	
E	0	.670	5.35	.655	1872	121
	1	.114	.653	.153	316	
	2	.114	.523	.122	253	
	3	.114	.485	.112	233	
	4	.114	.523	.122	253	
	5	.114	.653	.153	316	

도체들은 795 kcmil ACSR Drake 이고 차폐선은 3/8 인치 강철이며, 최저 지상고 35 피트이다. 배열 A, B, C 가 6상 페이서에 대해서 공간을 가장 잘 활용하고 있는 구조이며, 반면에 D, E는 기존 3상 2회선 선로를 6상으로 변경하여 효율적으로 적용하기 위한 것으로서 보다 재래적인 구조이다. 배열 A, B, C의 도체간격이 가장 최적의 최소 공간에 접근하는 1.732 피트로 감소되면, 그 임피던스는 약 10-15% 감소된다.

임피던스를 비교하면 아래와 같다.

- 정상 써어지임피던스는 3상보다 6상이 약간 더 높다.
- 정상유도리액턴스는 3상보다 6상이 약간 더 높다.
- X_0/X_1 비는 6상이 3상 보다 더 높다.

3상선로와 6상선로 사이의 정상 리액턴스와 써어지임피던스의 변화는 약 15%이다. 상수가 증가함에 따라, 그림 4의 써어지 임피던스의 경향에서 보여주는 것처럼 이 변화는 더 커지게 된다.

X_0/X_1 의 비는 더 큰 변화량을 나타낸다. 그림 5의 A구조로 배열된 3, 6, 12, 24상에 대한 X_0/X_1 의 변화가 그림 6에 보여져 있다. 이러한 크기변화는 계통사고 중의 과전압에 특히 중요하다.

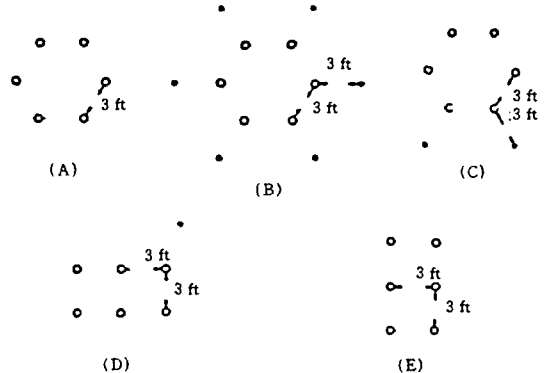


그림 5. 80KV 상전압 계통의 대표적 송전선로 도체배열

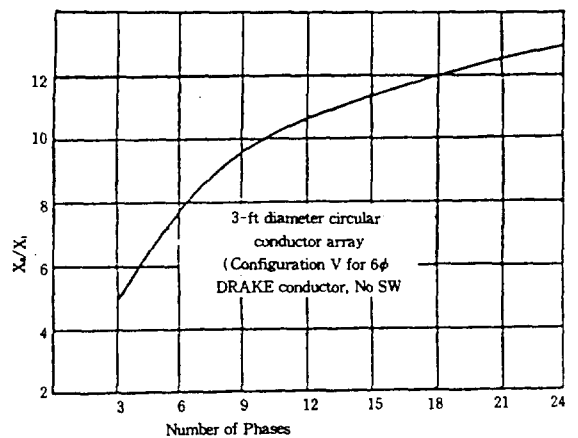


그림 6. 8상수에 따른 X_0/X_1 비율

임피던스 균형을 위해 3상선로의 도체들은 자유롭게 연가될 수 있는데 반해, 고다상선로에서는 공간을 효율적으로 활용하기 위해 전기적으로 인접한 상들이 물리적으로 인접해야 하기 때문에 고다상 선로들은 그런 자유로운 연가에는 적합하지 않다. 그러므로, 고다상선로는 전 도체배치를 여러단계로 회전시킴으로써 연가를 하게 된다.

4. 전계와 자계

4.1 전계

상배열 중심높이 h , 반경 R 의 원형배열에 대해 지표면에서의 전위경도를 계산하는 것이 가능하다. 높이 h 는 지표면에서 가장 가까운 지점인 경간중앙의 높이이다.

그 전위경도의 측면도는 상배열의 중심에 대해 대칭이다. R 과 h 에 대한 표본 치수를 사용해서 다양한 상수에 대해서 계산한 최대전위경도 결과치가 그림 7에 보여져 있다. $h=50[\text{ft}]=15.2[\text{m}]$ 인 기본배열에 대해 최대전위경도는 6상이 3상보다 약 20% 더 높다. 이 경우는 3상배열(∇)의 꼭지점이 아래로 향한 역델타배열의 경우에 대한 비교치이며, 삼상배열(Δ)의 꼭지점이 같은 높이의 두도체보다 위에 있는 델타배열의 경우에 대해서는 6상이 3상보다 약 15% 더 높다. 선로 중앙에서의 높이에 따른 지표면 전위경도는 그림 8에 보여져 있다.

지표면에서의 전계세기는 더 높은 초고압 EHV(or UHV)수준의 3상 송전선로에 대해 중요한 설계판단 기준이 될 수 있다. 고다상에서는 지표면 전계세기가 증가한다. 전계세기를 설명하기 위해 그림5의 기본적인 배열에 대해 분석했다. 그림 5의 A배열에 대해 최대 도체표면 전위경도와 최대의 지면전위경도의 계산결과가 표 3과 그림 7에 요약되어 있다.

데 반해, 지면에서의 전계세기는 증가한다. 이것은 도체 표면전계와 관계가 깊은 코로나와 관련된 현상은 상의 수가 높아짐에 따라 더 작은 관심사가 되는 반면에, 지면전계효과는 상수가 높아짐과 함께 더 큰 관심 사항이 된다는 것을 의미한다. 표 4에서 보여주는 것처럼 차폐선을 추가하면 도체표면 전계가 증가하고 지표면의 전계는 감소한다.

표 3. 대칭적인 도체배열의 전계
(6상 80KV 상전압, 그림3(A)구조)

상수	최대도체표면전계(KV/cm)	최대지표면전계(KV/cm)
3	12.0	0.4
6	10.5	0.7
12	7.4	1.0

표 4. 그림5의 6상배열의 전계

상간거리(ft)	차폐선수	배열	최대도체표면전계(KV/cm)	최대지표면전계(KV/cm)
3	0	A	10.5	0.70
3	6	B	11.2	0.43
3	2	C	11.2	0.36

4.2 자계

송전선로의 자계는 전류변화에 따라 변하는 통계적인 특성 때문에 전계보다 특성을 나타내기가 어려우며, 통계적으로 분석하는 것이 적합하다. 전류의 불균형이 자계변화에 큰 역할을 하게되며, 자계의 크기는 상도체의 중심에서 더 멀리 떨어진 거리일수록 영상전류에 의해 주도적으로 결정된다. 그림8에서 5가지 형의 대표적인 345KV 선간전압 3상 1회선 선로들과 138KV 상전압 12상 선로에 대한 선로중앙 지표면에서의 자계의 단면 프로파일을 나타내 준다. 5가지 3상선로는 7.3m 간격의 수평배열, 6.1m 간격의 수평배열, 6.1m 간격의 델타배열, 6.1m 간격의 역델타배열, 4.9m 간격의 수직배열이고, 12상은 0.91m간격의 원형배열이며, 모든 경우에 최소 도체 높이는 12m이다. 12상 선로는 상전압 138KV에서 1회선 3상 345KV 선로와 동일한 450MVA의 써어지 임피던스 로우딩과 열정격 1,625MVA 를 가지게 된다. 여러 345KV 3상배열 중에서 역델타형이 가장 자계 수준이 낮으며, 12상 선로는 이 보다 더 낮다. 참고로, 2회선 역상선로인 경우는 자계상쇄의 효과가 있어 12상 보다 더 낮은 값으로 된다. 그런데, 이 경우에도 12상선로의 구조물은 기존 3상선로 보다 상당히 작아 지상고를 높이기 쉬우며, 가장 낮은 상도체를 맞춘 비교가 아니라 가장 높은 상도체를 맞추어 비교할 시에는 12상 선로 직하의 자계가 더 낮게 된다. 이 그림에서 L50은 특정한 날씨조건에서 특정 시간대의 50% 시간동안 초과하는 크기를

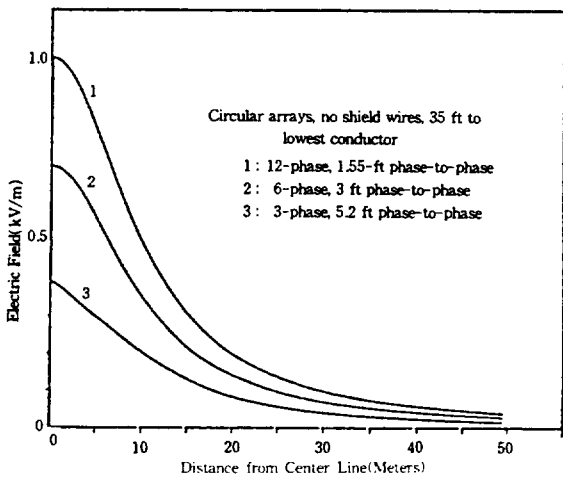


그림 7. 지표면 전계

상이 증가함과 함께 도체표면에서의 전계가 감소하는

나타내는 용어이다.

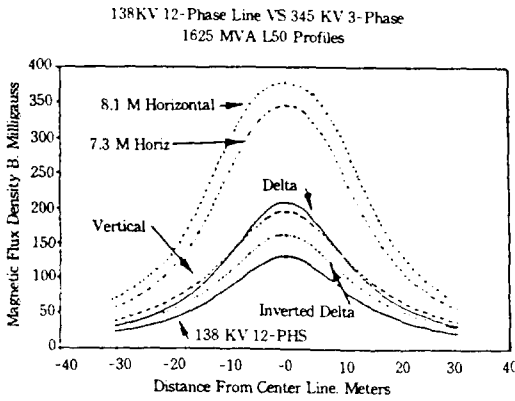


그림 8. L50 자계 비교

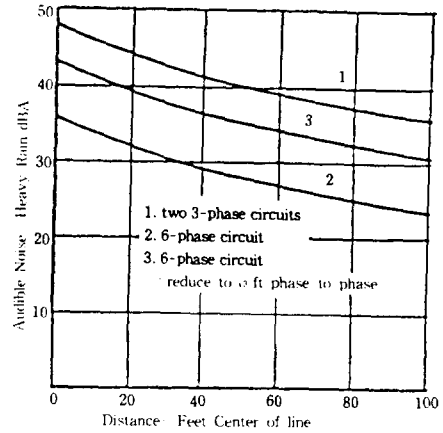


그림 10. 가청 소음

5. 라디오 소음 및 가청 소음

상수를 증가시킴으로써 도체표면 전위경도가 감소하게 되어, 도체표면전계와 관계가 깊은 코로나와 관련된 현상은 그 영향이 감소하게 되므로, 가청소음(Audible Noise)과 라디오소음(Radio Noise)은 줄어들 것이다. 따라서, 상의 수가 높아짐에 따라 코로나와 관련된 소음은 더 작은 관심사항이 된다는 것을 나타낸다. 상전압이 80KV인 여러 도체배열의 라디오 소음 성능이 그림9에 보여져 있다. 물리적인 구조를 변경시키지 않고 선로를 6상으로 변경시키면 최대 라디오 소음이 약 8.6dB 감소하게 된다. 이것은 도체표면전계의 최대치가 14.04 KVrms/cm에서 10.5 KVrms/cm로 감소하기 때문이다. 이러한 비교는 도체수를 같게 하는 조건하에서 2회선 3상회로보다 더 높은 상수로 했을 때가 라디오 소음 성능이 개선됨을 나타낸다.

가청 소음(Audible Noise) 현상도 도체표면전계의 함수이기 때문에 라디오 소음과 거의 같은 경향이 관측된다. 그림 9와 같은 각 도체배열에 대한 가청 소음이 그림 10에 보여져 있다. 경우 조건하에서 1회선 6상회로가 2회선 3상 회로보다 12.1 dB 더 작은 소음 수준을 가진다.

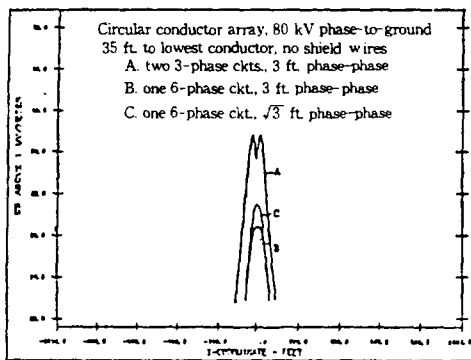


그림 9. 라디오 소음

6. 과전압과 절연

절연과 소요절연간격은 선로와 설비설계의 주요 성분들이며, 스워칭써어지, 낙뢰와 같은 과도적인 성질의 과전압을 포함해서 많은 Factor들에 달려있다. 사고와 같이 계통구성변화가 일어날 때 까지 지속되는 과전압은 절연과 계통운용에 큰영향을 미친다.

다상원형배열로 된 물리적인 도체의 위치를 묘사하는 벡터 다이어그램은 도체전압을 나타내는 페이서 다이어그램과 같다. 6상배열의 경우 한 상을 인접한 상으로부터 지지하는데 요구되는 절연은 영전위인 대지로부터 그 상을 지지하는데 요구되는 절연과 같으며, 6상이상의 다상회로에 대해서는 선간절연 요구치가 중성점에 대한 상절연 요구치보다 작게된다.

6.1 사고과전압

3상 계통에서 X_0/X_1 비율증가는 일반적으로 사고과전압의 증가를 가져오며 고다상에서도 비정상적으로 높은 과전압이 발생할 가능성을 나타낸다. 이러한 가능성을 조사하기 위해 저항을 영으로 가정하고 X_0/X_1 의 함수인 사고 과전압을 여러 상수에 대해 계산하였다. 그 결과가 그림 11에 보여져 있다. 6상이나 이 이상으로 높은 상의 계통에서 어떤 두상 사이에서 가장 높은 정상상태 전압은 상전압의 두배이다. 그러므로, 비접지계통에 대해 한 상의 사고로 다른 상의 전압이 상전압의 두배로 상승될 수 있다. 이것이 그림 11에 보여져 있다. 전형적인 X_0/X_1 비와 그림 11의 결과들을 종합하여 사고과전압을 산출하면 표 5와 같다. 그 경향은 과전압이 6상 계통에서는 증가하고, 12상과 그 이상의 높은 상의 계통에서는 감소한다. 이 계산치는 저항이 무시되고, 가공지선이 없고 선로임피던스 효과만이 고려되기 때문에 전형적인 송전계통에서 발생하는 것보다 약간 더 높다. 그러나, 가

혹한 가정에 대해서 까지도 고다상선로의 사고에 기인하는 과전압이 3상 계통의 그것을 크게 초과하지 않는다.

표 5. X_0/X_1 비에 대한 과전압

	선로 X_0/X_1 비	사고과전압
3	5.00	1.35 p.u.
6	7.77	1.53 p.u.
12	10.60	1.45 p.u.
24	13.00	1.35 p.u.

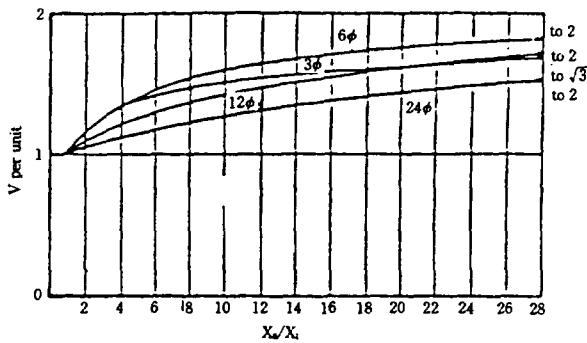


그림 11. 건전상의 전압상승

6.2 스위칭써어지와 회복전압상승률(RRRV)

재래의 3상 송전의 절연요구조건들을 결정할 때 상대지간, 선간의 스위칭써어지를 둘다 고려해야 한다. 그러나, 상대지간 요구조건이 대개 더 제한적이다. 이것은 개념적으로 그림 12.(A)의 페이서 다이어그램에 의해 설명될 수 있다. 상전압의 두배인 2.0 p.u.의 써어지가 상 A에 발생한다면, 페이서 다이어그램으로부터 선간전압 A-C, A-B는 2.65 p.u.이고 정상 선간전압의 1.53배이다. 그러므로 상대지간 써어지가 더 제한적이 될 것이다. 일반적으로 송전탑이 접지된 철구조물이기 때문에 선간 소요절연간격대 상대지간 소요절연간격의 비가 정상상태의 전압비인 $\sqrt{3}$ 보다 훨씬 더 크다. 그림 12.(B)에서 볼 수 있듯이 2.0 p.u.의 써어지가 상 A에서 발생한다면, 최대의 선간 써어지는 6상 계통에 대해 정상상태의 선간전압의 1.73배이고, 12상 시스템에 대해서는 2.39배이다. 이 단순화된 분석으로 상의 수가 증가함에 따라 선간 써어지가 상대지간 값에 비해 증가하게 되어, 더 중요하게 된다는 것이 설명된다. 각 스위칭 회로에 대해 차단기가 임의의 페로 제약조건을 가지고 50회 페로되었다. 상대지간과 선간의 써어지의 최대크기가 표 6에 기입되어 있다. 이 결과들을 통해 상대지간 써어지보다

선간 스위칭써어지가 선로 소요절연간격을 포함하는 스위칭써어지 절연설계에서 더 중요성을 가진다는 것을 확인하게 된다.

차단기가 그 단말 가까이에서 사고를 차단하는 능력은 개로중에 차단기 단말 사이의 회복전압상승률(RRRV)에 의하여 크게 영향을 받는다. 아아크의 재발생 없이 성공적인 차단을 보장하기 위하여 차단기 갭의 절연내력이 RRRV보다 더 빨리 증가해야 한다. 모든 조건에 대해서, RRRV는 같은 단락회로 용량에 대해서 3상계통보다 6상계통에서 더 작다.

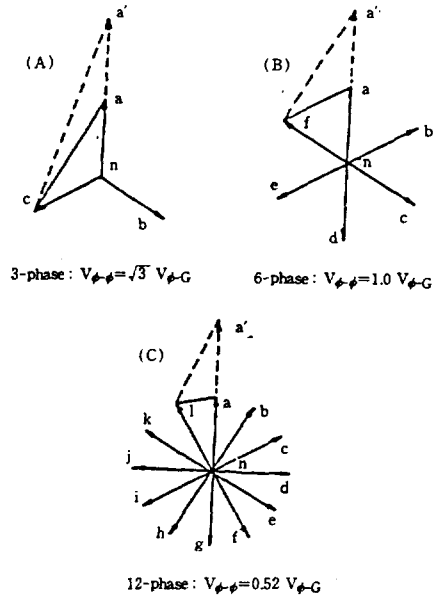


그림 12. 선간 스위칭써어지에 대한 상수의 영향

표 6. 투입 써어지의 최대크기

상수	투입여부	상대지간 써어지 상대지간 전압 p.u.	선간 써어지 선간 전압 p.u.
3	No	2.864	2.093
3	Yes	1.454	1.316
6	No	2.764	3.200
6	Yes	1.462	1.547

6.3 낙뢰

송전선로에 대한 낙뢰의 트립아웃 비율은 아래 사항에 달려있다; 선로에 대한 뇌격의 수, 철탑이나 차폐선에 뇌격이 일어난 후 그 지역 전위상승과 함께 뒤이어 철탑으로부터 전력선으로 플래쉬오버를 일으키는 것(역섬락)과 전력선에 일어나는 직격뇌(차폐실패)의 비율, 아아크를 지속시키기에 불충분하여 스스로 소멸하는 순간적인 60Hz 전압에 기인한 플래쉬오버의 수, 스트로크의 크기와

파형과 같은 스트로크 특성 등. 마지막 항을 제외하고는 각 영향이 통상적인 3상 선로와 고다상선로에 대해서 다르다.

선로에의 스트로크의 수는 아래와 같이 추정될 수 있다.

$$N = I \times (0.0189 \times h + 0.0047 \times b) \quad (14)$$

여기서, N=회/100마일·연
I=연간뇌우일수
h=전선평균높이
b=철탑폭

6상선로는 선로의 크기가 축소되기 때문에 선로에의 스트로크 수는 2회선 회로에 대한 것 보다 약 20% 더 작다. 역섬락은 철탑에 흐르는 스트로크에 의한 전류로 인하여 철탑전위가 절연수준을 초과하는 전위이상으로 충분히 상승될 때 발생한다.

상대지간 절연체 사이의 전압표현은 다음과 같다.

$$V_{ins} = V_{tower} - K \times V_{shield} - V_{60} \quad (15)$$

V_{ins} : 뇌격후 애자런사이의 순간전압
 V_{tower} : 순간 철탑전위
 V_{shield} : 순시 차폐선 전위
 V_{60} : 60Hz 상전압의 순간치

그림 13의 두 구조물에 대한 V_{ins} 의 차이는 작고, K는 근사적으로 같다. 철탑 써어지 임피던스와 전파시간은 6상 철탑에서 약간 더 작고, 차폐선의 임피던스는 더 작은 스페이싱 때문에 약간 더 높을 뿐이다. 그러므로 역섬락 성능은 매우 유사하다. 전력선의 써어지 임피던스는 차폐선이 있는 철탑의 써어지 임피던스 보다 훨씬 더 높기 때문에, 전력선 직격뇌 발생 이후 애자장치로 역플래쉬오버가 일어날 확률이 철탑이나 차폐선에 뇌격이 발생한 후 역플래쉬오버가 일어날 확률보다 훨씬 더 높다.

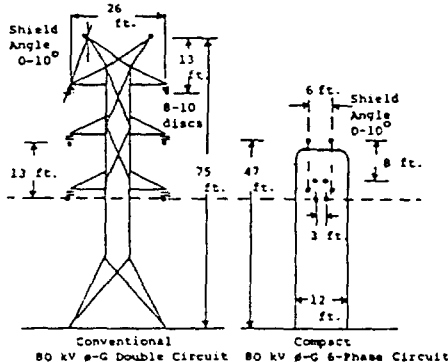


그림 13. 표준 80KV 상전압 3상2회선선로와 6상 콤팩트 선로의 비교

전체적인 고다상 선로의 낙뢰에 대한 성능은 효과적인 차폐를 가정하면 3상선로와 비슷할 것이다. 선로가 차폐되지 않았거나 차폐실패가 일어난다면 고다상선로에는 더 많은 상간 플래쉬오버가 일어날 것이고 그러므로 더 높은 트립아웃율을 나타낼 것이다.

6.4 단말절연요구사항

변압기와 같은 단말장치의 절연은 적용된 써어지 아레스터의 보호특성에 의해 결정된다. 아레스터에 가해지는 지속적인 전압과 계통과도전압에 맞추어 써어지아레스터를 설치하게 된다. 고다상계통을 3상계통과 비교할 때 낙뢰와 스위칭 써어지가 고려되어야 한다. 고다상계통의 낙뢰 응답은 3상계통과 크게 다르지 않다. 고다상선로에서의 더 높은 써어지 임피던스는 그림 14의 등가회로에서 설명될 수 있는 것 처럼 낙뢰와 스위칭써어지의 방전기간 중에 아레스터 보호 마진을 향상시킨다.

이 회로에서,

$$V_{sa} = V_s \left(\frac{R_{sa}}{Z_s + R_{sa}} \right) \quad (16)$$

여기서, Z_s 는 선로 써어지 임피던스, R_{sa} 는 아레스터의 등가 임피던스, V_s 는 등가 써어지 전압, V_{sa} 는 써어지 전류가 흐를 때의 보호수준이다.

이 식에서 Z_s 가 증가하면 V_{sa} 가 감소할 것은 분명하다. 고다상계통에서 써어지아레스터는 3상계통에서의 요구사항과 유사한 낙뢰와 스위칭써어지 책무를 가지게 될 것이다.

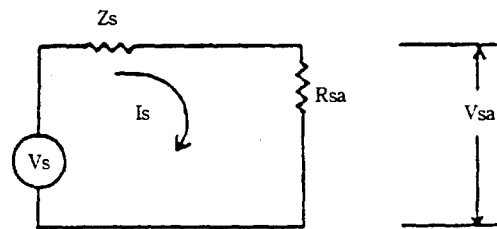


그림 14. 과전압 보호 분석을 위한 등가회로

6.5 도체스페이싱

상전압이 일정할 때 상수를 증가시키면 순간전압은 감소하기 때문에 선로도체 스페이싱은 감소될 수 있다. 감소의 정도는 착빙설, 바람, 고장전류에 기인하는 개개 도체의 움직임에 의해 제한을 받는다.

착빙설에 의한 정적 및 동적 도체변위는 소요절연간격을 제한할 수 있다. 한 경간의 여러 도체상에 있는 동일하지 않은 착빙설 하중은 대개 도체 사이에 요구되는 수

직거리를 결정하기위해 사용된다. 최대의 풍압하중은 송전선로경과지 폭을 결정하는데 중요하다. 도체의 운동은 고장전류에 의해 일어날 수 있는데, 고장전류에 의한 자계력이 도체진동을 일으킬 수 있으며, 이격거리를 감소시켜 전력선의 섬락을 일으킬 가능성도 있다. 절연 스페이서의 길이는 주로 오염요구치에 의해 주로 결정된다.

7. 결 론

고다상(HPO)송전에 관해 간단히 요약하면 다음과 같다.

- 3상 가공선로의 공간이용도는 공기를 절연체로 사용하는 개방된 전선로의 본질적인 전력전송 제한치에 비해 낮다.
 - 전력전송 공간을 콤팩트화하여 공간이용도를 높이는 하나의 방법이 상수를 증가시켜 원주상에 배열시키는 고다상 송전방식이며, 같은 송전선로경과지(ROW)상에서 동일한 전계/자계와 소음기준하에서 3상보다 더 많은 전력을 전송할 수 있다.
 - 상수를 증가시키면 도체표면의 전위경도는 감소한다. 그러나, 지표면 전위경도는 상승한다.
 - 라디오 소음, 가청 소음은 상수의 증가와 함께 감소된다.
 - 상수가 증가함에 따라 인접한 선간전압이 낮아지기 때문에 고다상 도체사이의 소요절연간격은 감소될 수 있으며, 고다상에서는 선간 스유헤어지가 도체절연간격 결정을 위해 중요성을 가진다.
 - 고다상선로(특히 6상선로)는 3상 결선과 탭으로 연결될 수 있기 때문에 기존계통과 호환할 수 있다.
- 주로 HPO송전의 전기적특성에 관해서 서술하였는데, 상수의 증가에 따른 변압기, 차단기, 보호계전기 등의 부대설비들이 더 보강되어진다면, 송전선로의 건설이 더욱 어려워질 것으로 예상되는 한국의 실정에서 고다상(HPO)송전기술의 도입을 검토해 보는 것도 전력사업에 도움이 될 것으로 본다.

참 고 문 헌

[1] J.R. Stewart and D.D. Wilson, "High Phase Order Transmission - A Feasibility Analysis Part I-Steady State Considerations", IEEE PES Winter Meeting, New York,NY, Jan. 1978, #F 78 160-4.

[2] J.R. Stewart and D.D. Wilson, "High Phase Order Transmission - A Feasibility Analysis Part II-Overt Voltages and Insulation Requirements", IEEE PES Winter Meeting, New York,NY, Jan. 1978, #F 78 161-2.

[3] I.S. Grant and J.R. Stewart, "Mechanical and Electrical Characteristics of EHV High Phase Order Overhead Transmission", IEEE/PES 1984 Transmission and Distribution Conference, Kansas City, Missouri, Apr. 1984, #84 T&D 318-2.

[4] M.T. Brown, R.V.Rebbapragada, T.F.Darazio and J.R. Stewart, "Utility System Demonstration of Six Phase Power Transmission", Proceedings-1991 IEEE Power Engineering Society, Transmission and Distribution Conference, pp983-989.

[5] J.R. Stewart, S.J.Dale and K.W. Klein, "Magnetic Field Reduction Using High Phase Order Lines", IEEE/PES 1992 Winter Meeting, New York,NY, Jan. 1992, #92 WM 284-0 PWRD.

저 자 소 개



이병하(李丙河)

1954년 7월 12일생. 1978년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 미국 Pennsylvania 주립대 전기공학과 졸업(공박). 1979년~1994년 한국전력공사 기술연구원. 현재 시립 인천대 공대 전기공학과



권태원(權泰遠)

1945년 8월 21일생. 1968년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 한전기술연구원 부처장.