

비연가 송전선로에서의 상불평형 해석 및 대책 수립

전동훈* 추진부* 윤용범* 김기동* 윤재영**
 * 한국전력공사 전력연구원 ** 한국전기연구원

Analysis of Phase Unbalance on Non-Transposed T/L

D.H.Jeon*, J.B.Choo*, Y.B.Yoon*, K.D.Kim*, J.Y.Yoon**
 * KEPRI ** KERI

Abstract - 본 논문에서는 계통의 모선 분리운전시 발생할 수 있는 송전선로에서의 상불평형현상을 해석하고, 이에 대한 해결방안을 제시하였다. 계통의 모선 분리운전시 2회선 송전선로에서의 상반된 조류방향이 송전선로의 상불평형정도를 증가시키는 직접적인 원인이 될 수 있다는 사실을 확인하였다. 이에 대한 현실적인 해결방안으로 송전선로의 상배열이 2회선 송전선로에서의 조류방향 변화와 어떠한 상관관계가 있는지를 모의하였다.

1. 서 론

우리나라는 전력수요의 급속한 성장과 함께 345kV 및 154kV 송전선로의 신.증설이 지속적으로 이루어져 복잡한 환상망 계통을 구성, 운전되어 왔다. 이와 같은 환상망 계통은 방사상 계통에 비하여 전력공급의 신뢰도가 높다는 장점이 있으나, 상대적으로 고장용량의 증가 및 조류 편중으로 인한 과부하를 다중적으로 발생시키는 단점이 있다. 특히 고장용량의 증가는 계통 보호를 위해 차단기의 용량도 함께 증가시켜야 하기 때문에 설비교체에 따른 경제적인 부담이 따르게 된다. 이에 대한 대책으로 154kV 계통은 전력공급의 신뢰도 저하를 감수하더라도 방사상 운전방식이 점차 확대 적용되고 있는 추세이다.

기존의 환상망 계통을 방사상 계통으로 운전하는 방법으로는 모선 분리운전시나 선로 분리운전이 적용되고 있는데, 최근 계통의 운전조건에 따라서 분리운전중인 모선의 인근 송전계통에서 상불평형 정도가 크게 증가하는 사례가 종종 발생하고 있다.

이에 본 논문에서는 계통의 모선 분리운전시 발생할 수 있는 송전선로에서의 상불평형현상을 해석하고, 이에 대한 해결방안을 검토하고자 한다.

2. 본 론

2.1 상불평형현상 발생원인

계통에서 상불평형현상의 발생 및 상불평형정도의 증가는 궁극적으로 에너지 손실의 증가로 귀착된다. 계통에서의 상불평형현상이 발생하고, 그 정도가 증가하는 원인은 발전, 송전, 부하 측면에서 분석해볼 수 있다.

2.1.1 발전계통 및 부하 측면

발전계통 및 부하에 문제가 있어 상불평형정도가 크게 증가한 경우에는 모선 분리운전 전에도 그런 현상이 발생해야만 한다. 그러나, 본 논문에서는 모선 분리운전이 송전선로의 상불평형에 미치는 영향을 분석하는 것을 목적으로 하고 있기 때문에 발전계통 및 부하 측면에서의 발생원인은 검토대상에서 제외하였다.

2.1.2 송전계통 측면

가) 비연가 송전선로의 상배열
 일반적으로 송전선로에서 상불평형이 크게 발생하는

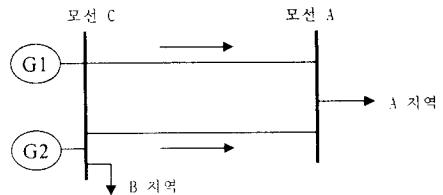
원인은 송전선로가 비연가되었기 때문인 것으로 알려져 있다. 그러나, 이러한 문제점은 송전선로의 연가화나 상불평형정도를 가장 적게하는 상배열(역상배열)로 상배열 배치를 변경함으로써 해결되고 있다. 그러나, 최근 송전계통이 점점 더 복잡해짐에 따라 각각의 경우에 맞는 적절한 상배열을 찾는 문제도 점점 더 어려워지고 있다.

나) 선로임피던스 [Z] 변화

모선 분리운전 전후계통의 선로길이 차로 인하여 선로 임피던스 [Z]에 변화가 생길 수 있다. 그러나, 실제 모선 분리운전이 선로길이에 미치는 영향은 극히 미약하기 때문에 고려대상에서 제외하였다.

다) 비연가 송전선로에서의 조류방향

송전선로의 상전류는 해당 상의 자기임피던스(Self Impedance)에 의한 전류성분과 다른 상, 또는 다른 회선간의 상호임피던스(Mutual Impedance)에 의한 전류성분의 합으로서 표현된다. 이때 양 회선에 흐르는 전류의 방향이 동일할 경우에는 자기임피던스에 의한 전류성분과 상호임피던스에 의한 전류성분의 위상이 거의 동일하여 상간 불평형 정도가 미미하게 된다. 그러나, 양 회선에 흐르는 전류의 방향이 상반될 경우에는 자기임피던스에 의한 전류성분에 위상차(최대 180°)가 존재하는 상호임피던스에 의한 전류성분이 중첩되기 때문에 결과적으로 송전선로의 상전류에 왜형을 일으키며, 상간 불평형 정도도 크게 증가할 수 있다.



(그림 1) 선로의 조류방향이 동일할 경우

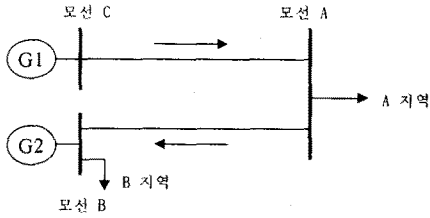
(그림 1)에서와 같이 C 모선의 G1, G2 발전기가 A, B지역에 전력을 공급하고 있다면 2회선 CA 송전선로의 조류방향은 동일하게 되며, 이때 비연가된 송전선로의 상배열은 상간 불평형이 최소화되도록 보통 역상배열로 구성된다. 한편 (그림 1)에서는 다음의 관계식이 만족한다.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C \text{ 모선 } V - A \text{ 모선 } V \\ C \text{ 모선 } V - A \text{ 모선 } V \end{bmatrix}$$

I, V : 상전류, 상전압

(그림 2)에서와 같이 (그림 1)과 같은 운전조건에서 C 모선이 분리운전되고, G2 발전기가 정지하였다고 가정한다면 A, B지역으로의 전력공급을 위해 CA 송전선로

와 BA 송전선로의 조류방향이 상반되게 되고, 이 경우 상반된 조류방향에 따른 자기임피던스에 의한 전류성분과 상호임피던스에 의한 전류성분의 위상차로 인하여 상간 불평형 정도가 크게 증가할 수 있다.



(그림 2) 선로의 조류방향이 상반될 경우

마찬가지로 (그림 2)에서는 다음의 관계식이 만족된다.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ -I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C \text{ 모선 } V - A \text{ 모선 } V \\ B \text{ 모선 } V - A \text{ 모선 } V \end{bmatrix}$$

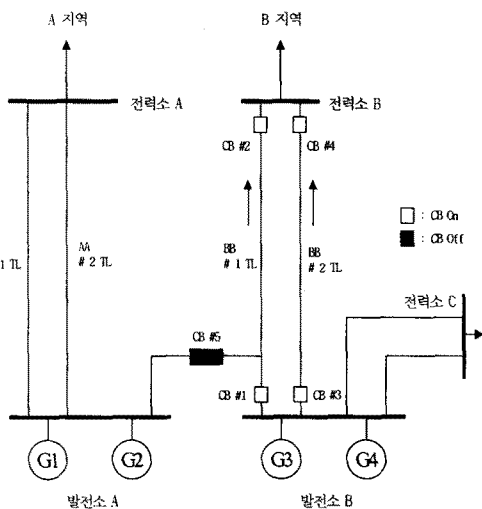
I, V : 상전류, 상전압

2.2 사례연구

2.2.1 송전선로 상불평형 발생시나리오

(그림 3)은 정상운전시 발전소 주변의 송전계통을 나타낸 것으로서 발전소 A(#1,2)는 전력소 A와 비연가 345kV 2회선 송전선로(AA T/L)로 연결되어 있고, 발전소 B(#3,4)는 전력소 B와 345kV 비연가 2회선 송전선로(BB T/L)로 연결되어 있다. 한편 발전소 A는 BB #1 T/L과 345kV 1회선 송전선로로 연결되어 있는데, 평상시에는 개방(CB #5 Off)되어 있다. 이와 같은 정상운전(CB #1 On, CB #5 Off)시에는 발전소 A(#1,2)에서 A 지역으로, 발전소 B(#3,4)에서 전력소 B, C로 전력이 공급되는데, 이때 BB T/L에서의 상간 불평형 정도는 미미한 수준이고, 현장에서의 측정값은 다음과 같았다.

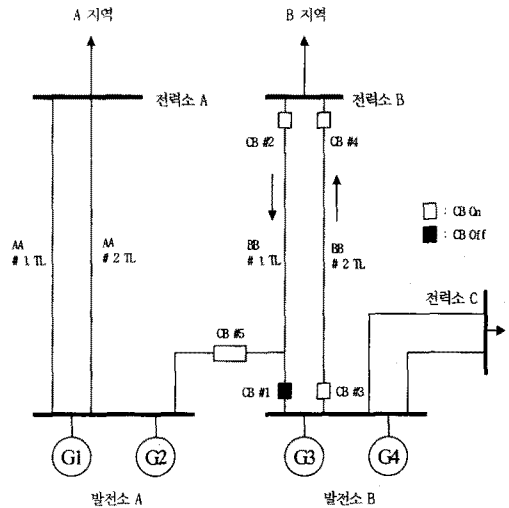
- ① BB #1 T/L (900MW)
A상: 1020A B상: 1030A C상: 1030A
- ② BB #2 T/L (900MW)
A상: 1080A B상: 1110A C상: 1110A



(그림 3) 발전소 인근지역 계통도 (정상운전시)

한편 비상상태 발생을 가정하여 이에 대한 조치결과로 A 지역의 전력수요가 감소함에 따라 A 발전소의 1,2호기가 출력을 감발(78%, 73%)하고, BB T/L을 비상운전하여 B 발전소측의 BB #1 T/L을 개방(CB #1 Off)하고, A 발전소측의 BB #1 T/L을 투입(CB #5 On)하는 순간, BB #1 T/L의 조류가 역류(B 전력소→A 발전소)하고, 상간 불평형 정도가 정상운전시보다 커지는 현상이 발생하였다. (그림 2)는 비상운전시 인근지역 계통도를 나타낸 것이다. 이러한 상황은 BB #1 T/L이 원상태로 환원될 때까지 유지되었으며, 이때 현장에서의 측정값은 다음과 같았다.

- ① BB #1 T/L (-440MW)
A상: 600A B상: 800A C상: 600A
- ② BB #2 T/L (1800MW)
A상: 2740A B상: 3040A C상: 2840A



(그림 4) 발전소 인근지역 계통도 (비상운전시)

2.2.2 상불평형정도 증가원인 분석

앞 절의 시나리오처럼 상전류가 발생하는지, 상불평형 정도가 커지는지를 확인하기 위해 BB #1 T/L과 BB #2 T/L의 조류방향이 동일한 경우와 BB #1 T/L과 BB #2 T/L의 조류방향이 상반된 경우를 모의하여 BB T/L의 상전류, 영상전류 변화를 비교하였다.

사례연구에서는 PSS/E, MATLAB, EMTDC를 사용하였다. 먼저 PSS/E를 이용하여 정상운전 및 비상운전시 각 모선의 전압크기와 위상각을 결정하였다. 각 선로의 선로임피던스 [Z]는 EMTDC를 이용하였다. 그 다음 앞 절에서 언급한 수식을 이용하여 정상운전 및 비상운전시 상전류를 계산하였다.

이때 해석결과의 정확성은 PSS/E로부터 계산된 모선 전압으로부터 상전압을 어떻게 유도하느냐, 송전선로를 얼마나 정확히 모의하여 선로임피던스 [Z]를 계산하느냐에 따라 좌우될 수 있다.

- (1) 동일한 조류방향일 때(그림 3)
가) 상전류

상대열		#1 회선		#2 회선	
#1	#2	크기	위상	크기	위상
a	c	1043	-89.1 °	1026	158.2 °
b	b	1069	31.6 °	1061	34.6 °
c	a	994	158.4 °	1010	-91.9 °

나) 영상전류

구 분	#1 회선		#2 회선		(영상분/정상분) *100			
	크기	위상	크기	위상	3.8	3.7		
영상분	39	-88.7 °	38	-167.1 °				
정상분	1034	-86.5 °	1030	153.7 °				
역상분	56	149.8 °	67	-82.9 °				

(2) 상반된 조류방향일 때(그림 4)

가) 상전류

상배열		#1 회선		#2 회선	
#1	#2	크기	위상	크기	위상
a	c	612	80.4 °	2829	161.2 °
b	b	774	-150.7 °	2987	35.5 °
c	a	555	-3.1 °	2700	-96.3 °

나) 영상전류

구 분	#1 회선		#2 회선		(영상분/정상분) *100			
	크기	위상	크기	위상	10.4	6.5		
영상분	65	95.5 °	182	-175.9 °				
정상분	626	94.3 °	2816	153.7 °				
역상분	177	-28.9 °	327	-85.2 °				

모의결과, 조류방향이 상반된 경우가 조류방향이 동일한 경우보다 불평형율(영상분/정상분*100)이 크게 증가하는 것으로 해석되었다. 특히, 정상운전시(그림3) 상불평형이 상화되도록 구성된 상배열(역상배열:ABC-CB A)이 BB #1, #2 T/L의 조류방향이 상반될 경우, 오히려 상불평형정도를 크게 악화시키는 상배열이 됨을 확인하였다.

BB #1 T/L : 3.8(%) → 10.4(%)

BB #2 T/L : 3.7(%) → 6.5(%)

한편 각 회선에서 발생하는 불평형율은 각 회선간 전류의 위상차나 크기등에 의해 좌우를 받는 것으로 분석되었는데, 사례연구에서 모선전압은 동일 계통하에서도 부하수준이나 발전출력 등에 의해서 다양한 값이 결정될 수 있기 때문에 위의 결과는 해석조건에 따라 정도의 차가 있을 수 있다.

2.2.3 상간 불평형조류 감소방안

앞 절로부터 BB 송전선로에서 상불평형정도가 크게 증가한 직접적인 원인은 BB #1, #2 T/L에서의 상반된 조류방향때문임을 알 수 있다. 특히, 정상운전시 상불평형을 최소화하도록 구성된 상배열(역상배열)은 BB #1, #2 T/L의 조류방향이 상반될 경우, 오히려 상간 불평형 정도를 크게 악화시키는 상배열이 되는 것으로 분석되었다.

이와 같은 상불평형정도를 감소시키는 방안으로는 다음과 같다.

(1) 비연가된 신양산 T/L의 연가화

연가 송전선로는 [Z]의 상호임피던스 성분이 거의 동일하여 발전계통과 부하가 평형일 경우 조류방향에 관계없이 상간 불평형 정도를 최소화할 수도 있으나, 현장 적용이 어려워 비현실적이다.

(2) 신양산 T/L의 상배열 교체(표 1)

조류방향에 따른 자기임피던스에 의한 전류성분과 상호임피던스에 의한 전류성분의 위상차가 상간 불평형 정도에 미치는 영향을 최대한 상쇄시킬 수 있는 상배열로

교체, 운전함으로써 상불평형정도를 감소시킬 수 있다.

그러나, 동일한 조류방향에서 상간 불평형을 최소화하는 상배열이 상반된 조류방향에서 상간 불평형을 증가(3.8%→10.4%)시키는 것처럼, 상반된 조류방향에서 상간 불평형을 최소화하는 상배열은 다시 동일한 조류방향에서 상간 불평형을 증가시키는 상배열이 될 수 있다. 따라서, 교체될 상배열은 조류방향이 동일한 경우와 조류방향이 상반된 경우 모두 상간 불평형이 가능한 한 최소가 되는 상배열이어야만 한다.

(표 1) 상배열 변화에 따른 상전류 계산결과 비교

상 전 류 방 향	상 전 류						상 배 열														
	I _a		I _b		I _c		I _a		I _b		I _c		I _a		I _b		I _c				
	크기	위상	크기	위상	크기	위상	크기	위상	크기	위상	크기	위상	크기	위상	크기	위상	크기	위상			
a b	1034	-86.5	1034	153.7	0	95	-87	38	-471	37	37	62	84	239	18.2	0	65	95.5	182	-175.9	
b c	94	152	96	108	0	58	141	75	-429	57	76	87	-34	238	105	0	30	263	157	-82.9	
c a	1034	-86.5	1034	153.7	0	95	-87	38	-471	37	37	62	84	239	18.2	0	65	95.5	182	-175.9	
a a	100	99	100	99	0	67	96	-148	66	66	94	-99	99	99	0	67	96	-148	66	66	94
b b	100	99	100	99	0	67	96	-148	66	66	94	-99	99	99	0	67	96	-148	66	66	94
c c	100	99	100	99	0	67	96	-148	66	66	94	-99	99	99	0	67	96	-148	66	66	94
a b	1034	-86.5	1034	153.7	0	95	-87	38	-471	37	37	62	84	239	18.2	0	65	95.5	182	-175.9	
b c	94	152	96	108	0	58	141	75	-429	57	76	87	-34	238	105	0	30	263	157	-82.9	
c a	1034	-86.5	1034	153.7	0	95	-87	38	-471	37	37	62	84	239	18.2	0	65	95.5	182	-175.9	
a a	100	99	100	99	0	67	96	-148	66	66	94	-99	99	99	0	67	96	-148	66	66	94
b b	100	99	100	99	0	67	96	-148	66	66	94	-99	99	99	0	67	96	-148	66	66	94
c c	100	99	100	99	0	67	96	-148	66	66	94	-99	99	99	0	67	96	-148	66	66	94
a b	1034	-86.5	1034	153.7	0	95	-87	38	-471	37	37	62	84	239	18.2	0	65	95.5	182	-175.9	
b c	94	152	96	108	0	58	141	75	-429	57	76	87	-34	238	105	0	30	263	157	-82.9	
c a	1034	-86.5	1034	153.7	0	95	-87	38	-471	37	37	62	84	239	18.2	0	65	95.5	182	-175.9	
a a	100	99	100	99	0	67	96	-148	66	66	94	-99	99	99	0	67	96	-148	66	66	94
b b	100	99	100	99	0	67	96	-148	66	66	94	-99	99	99	0	67	96	-148	66	66	94
c c	100	99	100	99	0	67	96	-148	66	66	94	-99	99	99	0	67	96	-148	66	66	94

3. 결 론

본 논문에서는 계통의 모선 분리운전시 발생할 수 있는 송전선로의 상간 불평형조류 발생원인을 분석하고, 이에 대한 해결방안을 제시하였다.

- ① 계통의 모선 분리운전시 2회선 송전선로에서의 상반된 조류방향이 송전선로의 상간 불평형 정도를 증가시키는 직접적인 원인이 될 수 있다는 사실을 확인하였다.
- ② 이에 대한 현실적인 해결방안으로 송전선로의 상배열이 조류방향 변화와 어떠한 상관관계가 있는지를 모의해 보았는데, 동일한 조류방향일 때, 2회선 송전선로에서 상간 불평형을 최소화하도록 구성된 상배열이 조류방향이 상반될 경우에는 오히려 상간 불평형정도를 악화시키는 상배열이 되는 것을 확인하였다.
- ③ 이런 관점에서 볼 때, 조류방향이 상반되지 않도록 계통을 운전하는 것이 최선이며, 계통의 운전조건에 상관없이 모선 분리운전을 하기 위해서는 조류방향이 상반되지 않도록 선로배열을 재구성해야 할 것으로 판단된다.

[참 고 문 헌]

[1] A.M.FOSS,S.P.DOWNS,H.URDAL, "Transmission System Voltage Quality Management in a Deregulated Environment", CIGRE 2000, Session No.37/38/39-103, pp44-49, 2000.
 [2] 윤용범,추진부, "송전계통에서의 영상 순환전류 감소를 위한 최적 상배열 결정기법", 대한전기학회 논문집 47-5-4, 1998