

중조류 선로 고장시 인접선로 과부하에 의한 거리계전기 동작 및 전압불안정 현상 연구

윤기섭*, 이형한, 김창곤, 안보순
 * 한국전력공사 남서울전력관리처

A study of impedance relay operation and voltage instability caused by over load of neighborhood line at contingency of heavy load line

Yun Ki-Seob*, Lee Hyoung-Han, Kim Chang-Gon, Ahn Bo-Soon
 Korea Electric Power Corporation(KEPCO)

Abstract - This paper presents the method of countermeasures before voltage collapse by load encroachment(impedance of load ability on R-X locus decrease toward zero point) and describes a study of impedance relay(zone-3) operation and voltage instability caused by over load of neighborhood line at contingency of heavy load line.

1. 서 론

최근 전력수요의 지속적인 증가와 전원의 편재로 인한 지역간 유통전력의 증가는 전력계통의 무효전력 불균형을 초래할 뿐만 아니라 중조류 송전선로 고장이라도 발생할 경우 계통전압이 이상적으로 저하하여 급기야 계통 대정전으로 진행되는 전압붕괴 현상을 발생 시킬 수 있다. 도심지 변전소간에는 재폐로 방식을 적용치 않는 지중송전선로 고장시 및 가공송전선로의 영구 고장시는 해당 송전선로 조류차단으로 인한 인근 송전선로의 과부하 운전이 불가피 하다. 과부하로 운전시 송전선 보호계전기에 적용하고 있는 3단계 거리계전방식의 Zone-3요소가 동작할 경우 연쇄적인 파급고장으로 진전되어 고장 확산을 가속화시킴은 물론 전압안정도에도 악영향을 끼친다.

2. 본 론

2.1 거리계전기(Zone-3 Unit)와 전압안정도

2.1.1 거리계전기 ZONE-3 동작과 광역정전
 Zone 3 계전기는 차단실패 보호 및 원거리 고장에 대한 후비보호를 할 수 있도록 정정된다. 범위를 벗어난 지점의 고장 및 zone 1과 zone 2 정정치 이내의 고장을 감지한 경우 주보호가 먼저 동작하도록 Zone3 계전기에 1초에서 2초사이의 시간지연을 부여한다. 선로의 구조 및 길이에 따라 더 큰 겐보기 임피던스 값으로 정정하여야 하기 때문에 일부 선로의 zone 3 계전기는 '장시간 비상한계'에 가까운 과부하 마진을 가지도록 정정된다. 그래서 선로고장이 없더라도 zone 3 계전기가 극단적인 고장상태의 선로 부하나 과부하에 대해 동작하는 것이 가능하다. 몇몇 송전운전자들은 zone 2 계전기를 zone 3 계전기와 같은 목적으로 움직이도록 설정한다. 즉, 다시 말해 선로 길이보다 더 먼 곳까지 감시하고 외부 선로에서 발생한 장거리 고장을 보호하게 한다. 인접선로 고장으로 인하여 과부하로 운전시(Load ability 와 계전기가 보는 ZONE-3 임피던스와의 마진은 약 150%로 정정함), 즉, 마진을 초과하여 고장이 없음에도 ZONE-3 영역에 Load locus가 진입하여 계전기가 고장으로 인식하여 100cycle후 차단기를 차단하였다, 이는 증가된 유효전력과 무효전력으로 겐보기 임피던스가 계전기의 동작영역 내에 들어왔기 때문이다. 이는 또 다른 인접선로 Zone-3 동작으로

과부하 차단, 고장 확산을 가속시킴

2.1.2 ZONE-3 동작에 의한 과부하 선로의 무효전력 공급과 전압안정도

인접선로의 과부하 송전선로의 유효전력의 송전을 위하여 송전선로의 여러 곳에서 무효전력이 요구된다. 무효전력은 송전선로에서 수송전류의 제곱에 비례하여 소비된다. 그래서 전력 송전량 10% 증가는 전력전송을 지원하기 위한 무효전력 발전량의 21%증가가 요구한다. 그러므로 더 많은 무효전력이 필요하게 된다. 송전선로는 무효전력을 생산과 소비를 동시에 하며, 경부하시에는 무효전력이 생산되고, 중부하시에는 무효전력을 소비한다. 설비나 기기들에 의한 무효전력 소비는 송전전압을 떨어뜨리는 반면, 무효전력의 생산(발전기) 또는 투입(콘덴서와 같은 저장장치)하면 전압을 올려 주는 특징이 있다. 무효전력은 멀리 이동하지 않는다, 특히 과부하 조건에서는 더욱 그러하므로 소비지점 부근에서 생산되어야한다. 이것이 하계 피크부하를 가지는 도심지 부하중심지가 일반적으로 동계 피크부하를 가지는 곳보다 전압불안정에 더 민감한 이유이다. 따라서 제어지역은 무효전력 예비력과 전압을 검토하고, 계통을 안전운전에 필요한 상태로 맞추어 계통 상황을 지속적으로 감시하고 평가해야 한다. 만약에 충분한 양의 무효전력을 즉시 공급받지 못한다면, 최악의 경우 '전압붕괴'가 일어날 수 있다.

2.2 154kV 역삼 및 잠송/T/L 2회선 고장시(안정)

2.2.1 고장시 인접선로 과부하 및 R-X궤적 검토

고장 선로명	과부하 선로 및 과부하율	Load ability 와 ZONE 3 Relay 동작영역	
		Margin	초과율
역삼	잔여 1회선 188%	150%+a	38% a
잠송	잔여 2회선 166%	150%+a	16% a

2.2.2 검토조건

- 2004년 하계전력계통 DATA(BASECASE.SAV)
- N-1,N-2 상정고장시 병행선로 및 인접선로 150%이상 송전선로 검토
- Load ability와 송전선 보호계전기 ZONE-3 계전기 Imp궤적(R-X)마진의 +a 및 -a는 제작사별 PSB(Power Swing blocking)Margin과 Load ability Margin에 따라 다름(일반적으로 160%-180% 적용)(NERC 권고사항 : ZONE-3 계전기 적용 시 비상조건에서 부하전류에 동작하지 않도록 송전선 Emergency전류 정격의 150%이상에서 정정)
- 송전선보호계전기 Impedance(R-X)궤적의 R3 및 X3값(ZONE 3 계전기 R측 X측 값)은 양단변전소 중 가장 큰 값을 계산 및 도시하였다.
- 154kV , 345kV 송전선로의 과부하 허용범위
 - 연속허용전류의 100-120% : 20분간
 - 연속허용전류의 120-150% : 5분간
- 최저 모션전압 : 0.95PU[전력거래소 권고치]

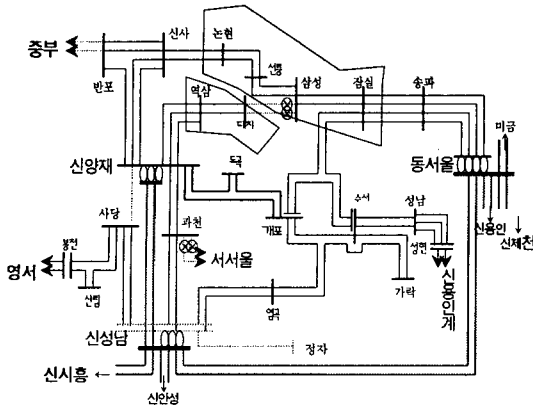
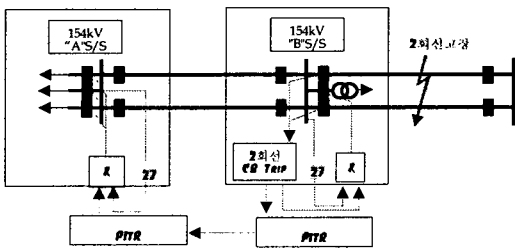


그림1 역삼 및 잠송 T/L 관련 계통도

2.2.3 역삼 T/L 고장시 모션전압 및 계전기 동작검토

- 1) ZONE-3 계전기와 과부하선로의 연관성
송전선로 고장시 고장전류를 계전기가 응동, 변전소 양단의 차단기를 트립시켜 건전한 전력계통으로부터 고장점을 분리한다. 계전기로부터 고장시간은 분리되나 고장선로의 부하는 인접선로 및 병행선로의 과부하를 초래하여 고장이 아님에도 과부하로 인하여 잔여선로의 계전기가 보는 App Imp가 송전선로 계전기의 ZONE-3영역에 진입하여 계전기가 고장으로 판단 건전한 선로까지 부하를 차단하여, 또 다른 인접선로의 과부하를 초래, 연쇄적으로 과부하 선로를 차단, 결국 광역정전을 유발.
- 2) 과부하율 188%로만 볼 때 역삼T/L 계전기가 Imp계적 내에 진입하여 ZONE-3 계전기가 동작할 것으로 예상되나, 계전기는 송전선로에 흐르는 부하전류와 모션전압의 비인 임피던스에서 의해 계전기가 응동하나, 잔여회선이 강전원단인 신양재S/S에서 계속 공급되고 있어, 역삼S/S 모션전압[1.0296PU 유지]이 거의 변동 없으므로 과부하에 의한 계적과 계전기 Imp계적 간에는 여전히 마진이 존재, 계전기는 동작하지 않는다.
- 3) 역삼 2개T/L 동작으로 인한 잔여 1회선의 과부하율이 188%이상 초과하여 송전선로의 과부하 허용범위를 초과하므로 부하차단장치에 의해 과부하 허용범위를 초과하는 부하 38%에 대해서는 신속히 차단하고 과부하 허용범위내 150%에 대해서는 급전운영자가 대성T/L ON→ 역삼 모션분리 →논현T/L ON→선릉T/L OFF→보광T/L ON→신사 모션분리등의 조치를 하여 역삼 잔여회선의 선로 이용을 감소시킨다.
- 4) 송전선로 고장파급방지장치
고장파급방지장치는 고장시 모션전압[0.95PU미만]은 물론 송전선로 과부하 허용범위를 초과하는 경우 모션전압은 유지범위내 송전선로 과부하 허용범위 초과하는 경우, 상기 경우에 변전소간 통신장치를 이용하여 자단 및 관련변전소의 부하차단을 적당히 분배하여 차단하여 모션전압유지 및 과부하 허용범위내로 유지코자 설치한다.



※ PTTR(Protective Integrated Transmitter & Receiver)
그림2 고장파급방지장치 구성도

2.2.4 잔여선로 보호계전기 동작검토
보호계전기 ZONE-3 정정치는 R3값이 1.0Ω , X3값이 0.932Ω이나, 과부하로 인한 App Imp는 약, R값이 5.0Ω , X값은 12.8Ω으로 보호계전기가 동작 가능한 Imp계적 내에는 진입하지 않았으며, 고장 후에도 상당한 여유를 가지고 있다.

2.2.5 역삼 2개T/L 고장시 과부하 및 모션전압 검토
고장파급방지장치는 역삼T/L 고장시 잔여회선이 188%로 송전선로의 과부하 허용범위[연속허용전류의 100~125% : 20분간, 120~150% : 5분간]를 초과하므로 역삼 S/S 부하 147.0~119.8MW(27.2MW)를 차단하고, 대치 S/S 109.3~89.0MW(20.3MW)의 부하를 차단하여 과부하율을 188%~152%로 감소시키고, 나머지 과부하에 대해서는 급전운영자가 154kV 대성T/L ON→ 역삼S/S 모션분리 →논현T/L ON→선릉T/L OFF→보광T/L ON→신사 S/S 모션분리등의 조치를 취 하여 역삼S/S 잔여회선의 선로 이용율을 감소시킨다. 또한, 고장후 모션전압은 0.95PU이상[1.0296PU, 158.57kV] 유지함.

T/L	모션전압 [P.U]	[kV]	유효 전류 [MW]	무효 전류 [MVAR]	ANGLE [°]	유효 전류 [kA]	무효 전류 [kA]	2시속 R	2시속 X	Imp
역삼	1.024	157.7	311.5	131.9	-36.9	1344	911	3.604	10.49	
	1.025	157.9	296.7	124.8	-36.4	1278	860	3.924	11.03	
	1.027	158.1	282.6	118.1	-36.0	1216	813	4.260	11.59	
	1.029	158.5	256.0	105.7	-35.2	1099	726	4.993	12.81	
	1.030	158.7	243.5	99.6	-34.8	1044	683	5.423	13.48	
	1.032	158.9	231.4	93.9	-34.5	991	643	5.874	14.20	
	1.033	159.1	219.8	88.4	-34.1	940	605	6.367	14.96	
	1.034	159.2	208.8	83.2	-33.8	892	569	6.892	15.75	

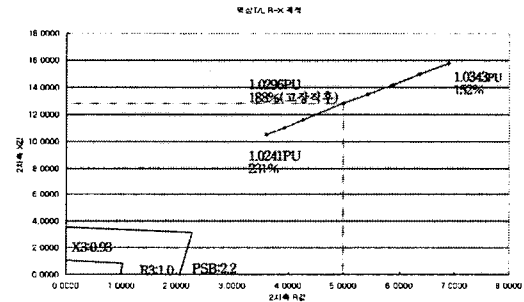


그림3 역삼S/S 역삼T/L 보호계전기 R-X 계적

▶ 역삼S/S측 검토조건

- 역삼S/S 역삼T/L 보호계전기(ZONE-3) 정정값 CT비 2000/5, PT비 154000/110: R3(1.0), X3(0.93)
- 2.2.6 154kV 잠송 2개T/L 고장시 병행선로 전압 및 보호계전기 동작검토
1) 고장시 잔여회선의 과부하율이 166%로 송전선로 과부하 허용범위 초과
2) 잔여 2회선이 강전원단인 345kV 동서울S/S에서 계속 공급되고 있어, 잠실 모션전압이 거의 변동 없어 [1.0295PU] 과부하에 의한 Locus 와 ZONE-3 계전기 Imp계적 간에는 여전히 마진이 존재하여 ZONE-3 계전기는 동작하지 않는다.
 - 3) 잠송 2개T/L 동작으로 인한 잔여 2회선의 과부하율이 166%이상으로 송전선로 과부하 허용범위를 초과하나, 초과량이 미미하므로 고장파급방지장치는 적용치 않고, 급전운영자가 154kV 대성T/L ON - 삼성S/S 모션분리 →보광T/L ON→논현T/L ON→신사S/S 모션분리등의 조치를 취하여 잠송T/L 잔여 2회선의 선로 이용율을 감소시킨다. 또한, 고장후 모션전압은 0.95PU이상 (1.0295PU, 158.54kV) 유지하므로 안정함.

2.3 154kV 연양#1,2T/L 2회선 고장시(불안정)

2.3.1 고장시 인접선로 과부하 및 R-X계적 검토

고장 선로명	과부하 선로 및 과부하율		Load ability 와 ZONE-3 Relay 동작영역	
			Margin	초과율
연양#1,2	산막	181%	150%+a	31% a

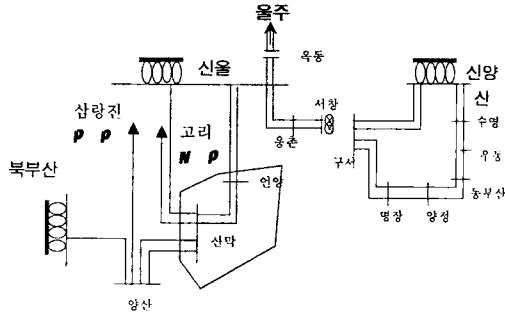


그림 4 연양T/L 관련 계통도

2.3.2 154kV 연양#1,2T/L 고장시 전압

1) 연양S/S

- 모선전압 : 0.8448PU(130.10kV),
- 유효전력/무효전력 : 153.2MW/50.4MVAR

2) 산막S/S

- 모선전압 : 0.8576PU(132.07kV),
- 유효전력/무효전력 : 103.4MW/27.0MVAR

2.3.3 연양#1,2T/L 고장시 대책

연양T/L 고장시 산막T/L의 과부하율이 ZONE-3 계전기 마진보다 31%이상 초과하므로 R측의 트립영역을 확장하기 보다는, 전압안정도 차원에서 전압이 안정한계점에 가까이 저하하므로 고장파급방지 장치를 설치, 부하를 차단하여 과부하 해소 및 적정전압을 유지가능

1) 고장파급방지 장치 설치

연양T/L 2회선 고장시 송전선보호계전기와 저전압계전기의 동작점점이 폐로되어 총102.7MW (연양 61.5MW, 산막 41.5MW) 부하 차단하여 과부하율 181% → 96%로 감소하여 ZONE-3 영역에 진입하지 않으므로 과부하로 인한 계전기 동작을 방지하고, 각 변전소 모선의 적정전압을 유지하도록 한다.

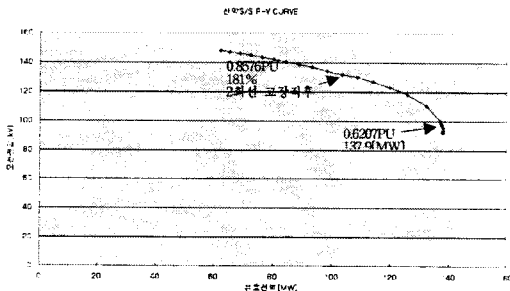


그림 5 산막S/S P-V CURVE(부하증감 전후)

2) 고장파급방지 장치 동작으로 각 변전소 부하차단 후

- 각 변전소의 모선전압, 유효전력 및 무효전력
- 연양S/S(부하차단량 : 61.5MW/20.2MVAR)
 모선전압 : 0.9554PU(147.13kV),
 유효전력/무효전력 : 91.7MW/30.2MVAR
- 산막S/S (부하차단량 : 41.5MW/10.8MVAR)
 모선전압 : 0.9618PU(148.12kV),
 유효전력/무효전력 : 61.9MW/16.2MVAR
- 유효 및 무효전력 Scale Power Flow step(5%)
 256.6MW(77.4MVAR) → 243.77(73.53) → 231.58(69.85) → 220(66.36) → 209(63.04) → 198.55(59.89) → 188.62(56.90) → 179.19(54.05) → 170.23(51.35) → 161.72(48.78) → 153.64(46.34)

T/L	모선전압		유효, 무효전력		ANGL E[°]	IR	IX	2차측 R	2차측 X
	[PU]	[kV]	[MW]	[MVAR]					
	0.599	92.28	338	112.5	-19.6	2499.26	1328.15	6.2790	6.8827
	0.609	93.91	339	112.0	-19.0	2461.14	1299.39	6.5869	7.0406
	0.620	95.58	339	111.5	-18.4	2420.89	1270.94	6.9147	7.2077
	0.631	97.31	340	110.8	-17.8	2379.38	1240.52	7.2762	7.3776
	0.640	98.68	339	110.9	-17.2	2340.06	1224.41	7.5686	7.5291
	0.662	100.5	338	110.0	-16.5	2294.59	1192.28	7.9912	7.7133
	0.716	110.3	329	103.3	-12.3	2030.59	1019.72	10.7768	8.7440
	0.766	118.0	313	95.4	-8.70	1805.91	880.339	13.8067	9.5559
	0.799	123.1	298	89.0	-6.03	1648.49	787.402	16.4110	10.0608
	0.845	130.2	270	78.2	-1.93	1412.17	654.088	21.3485	10.7757
	0.857	132.0	257	77.4	-0.32	1336.32	638.525	23.0346	11.2483
	0.874	134.6	244	72.6	1.29	1235.96	587.581	25.6482	11.4927
	0.901	138.8	220	63.9	4.08	1081.43	501.558	31.1008	11.8149
	0.912	140.5	209	60.0	5.3	1014.11	465.050	33.9681	11.9186
	0.932	143.5	189	52.9	7.48	896.215	401.451	40.0197	11.9683
	0.948	146.0	170	46.6	9.36	794.782	347.636	46.6207	11.8534
	0.955	147.1	162	43.7	10.21	749.597	323.619	50.1384	11.7051
	0.961	148.1	153	41.0	11.01	706.898	301.586	53.8428	11.5300

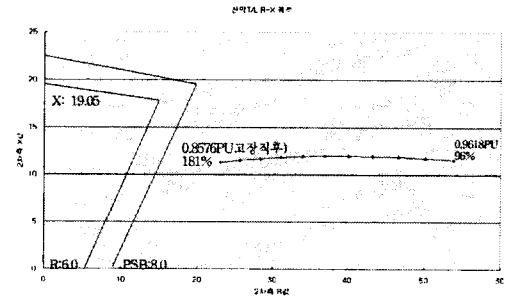


그림 6 산막T/L 보호계전기 R-X 궤적

▶ 산막S/S측 검토조건

산막S/S 산막T/L 보호계전기(ZONE-3) 정정값
 2000/5, PT비 154000/110 기준 : R3(6.0),X3(19.05)

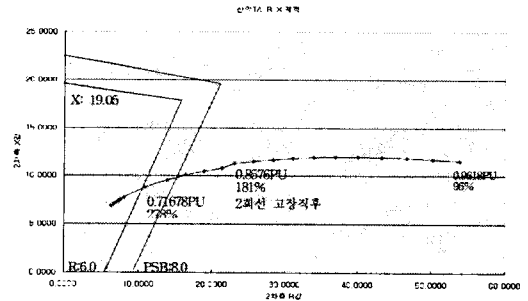


그림 7 산막T/L 보호계전기 R-X 궤적(부하 증가후)

3. 결 론

중조류 선로 고장시 인접선로의 과부하에 의하여 거리계전기 동작 방지 및 전압안정도 향상을 위해서는 평상시 송전선로의 장시간 과부하 운전선로 해소 및 근단 전원확보가 필요하나 이는 현실적으로 단기내내 조치가 곤란하므로, 고장파급방지장치를 설치하여 Load locus가 R-X궤적 내 진입시 부하를 순시 차단하여 전압회복은 물론, 또 다른 인접선로의 Zone-3 동작 방지하여 고장확산을 예방할 수 있다. 또한, 저전압과 부하관계를 고려한 정확한 저전압계전기 동작을 위해서는 기존의 전압양만으로 부하를 차단하는 저전압계전방식을 임피던스 까지 고려한 adaptive relay scheme 개발 및 적용을 검토하여야 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] Taylor, Power System Voltage Stability
- [2] Kundur, Power System Stability and Control
- [3] 전력거래소, 2004년 하계전력계통 운영 검토서