

電力系統安定化 保護繼電技術

신 대 승*

(*한국전기연구소 연구위원)

1. 머릿말

전력계통은, 발전기, 변압기, 모선, 선로 등을 주요요소로한 많은 설비요소로 구성되며, 이들이 일체로 되어 하나의 안정상태를 유지하면서 운용되고 있다.

전력계통 구성요소중, 특히 가공선로는 지역적으로 널리 분포되어있으므로, 뇌, 풍우, 염분등 자연현상의 영향을 받아 단락, 지락등 계통사고 발생이 불가피하며, 또 다른 구성요소들도 각각 고유한 사고형태와 사고빈도를 가지고 있다.

보호방식은 이들 각종 설비에 사고가 발생하였을 때에, 신속히 사고설비를 계통에서 제거하여, 사고전류의 계속으로 인한 설비손상을 방지하는것을 그 기본목표의 하나로 하고 있다.

그러나 사고발생은 단지 설비의 손상을 가져올뿐만 아니라, 하나의 안정상태를 유지하고 운용되고 있는 전력계통 전체에 대해서, 이 안정을 무너뜨리는 방아쇠로 작용하며, 사고의 계속, 또는 사고제거

에 따른 계통구성의 급변등은 주파수의 저하, 계통탈조, 설비과부하등으로 파급되어 전계통 붕괴로 확대될 가능성을 가지고 있다. 이러한 경향은 전원의 원격화와 집중대용량화, 선로조류의 증가등으로, 계통이 복잡화함에 따라 더 증대하고 있다. 표 1은 해외의 대정전사고 예를 보인다.

이러한 배경을 바탕으로하여 보호방식의 책무는, 종전의 설비보호 위주에서 사고파급방지에 의한 계통보호(Protection for Power System Disturbance)로 그 중점목적이 옮겨가고 있으며, 이 사고파급방지보호장치를 계통안정화장치라고도 한다.

2. 사고파급방지보호(事故波及防止保護) 적용의 기본방향

사고파급방지보호는 대규모사고로 진전되는것을 막기위하여,

- 1) 국부적인 계통동요 동안에 조치를 취하여 연쇄적 사고파급을 억제한다.
- 2) 정전구간의 범위를 국한시킨다.

이러한 기본방향에 따라 구체적으로는 다음과 같은, 계통동요현상에 의한 파급을 방지하기위하여 사고파급보호장치를 적용한다.

- 1) 주파수 이상저하
- 2) 계통의 탈조
- 3) 기간계통설비의 과부하
- 4) 전압의 광범위한 저하

표 1. 해외에서의 중요 정전사고 예

발생일	국 명	사고건명	원 인	정전의 규모	
				공급지장	정전시간
78 12 19	프랑스	프랑스 대정전	송전선 과부하	2800만 Kw	10 H
82 12 22	미 국	미국서부 정전	철탑도괴	1000만 Kw	4 H
83 12 27	스웨덴	스웨덴 정전	LS의 과열	1140만 Kw	5.5 H
87 1 12	프랑스	프랑스서부 정전	발전기 Trip	900만 Kw	5 H
87 7 23	일 본	동경일부 정전	전압강하	800만 Kw	3.3 H
89 3 13	캐나다	캐나다퀘벡주 정전	사기폭풍	2000만 Kw	9 H

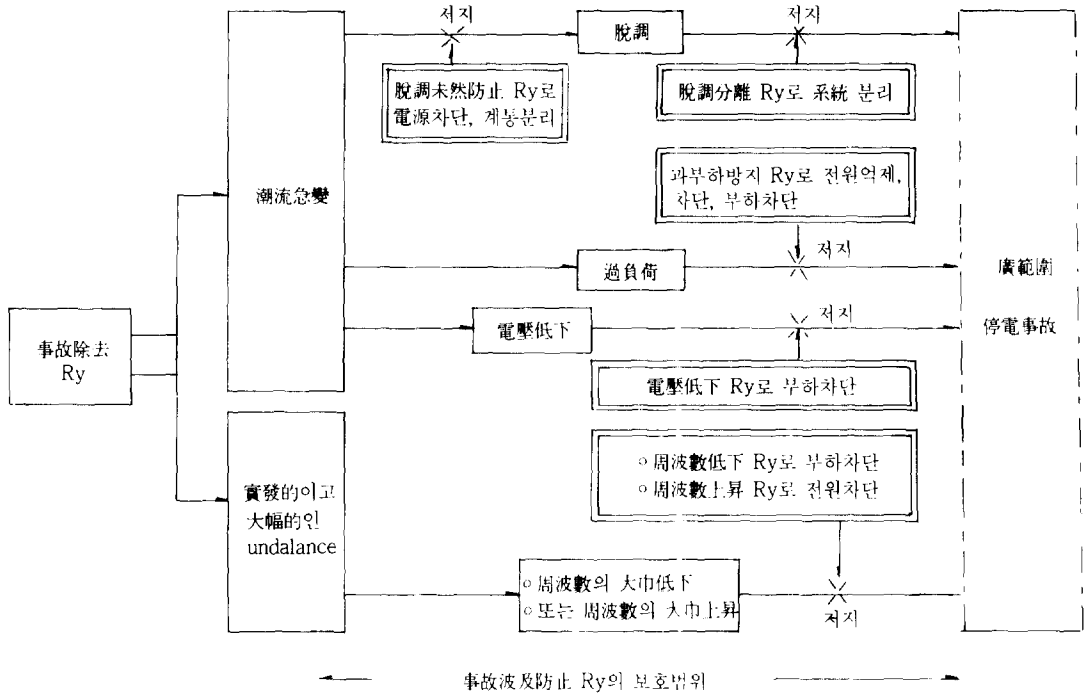


그림 1. 사고파급방지보호장치의 보호범위

등이며, 이중에 4)항의 전압의 광범위한 이상저하 문제는 최근 수년전부터 주목된것으로서 본격적인 대책은 이제부터의 과제가 될것이다.

그림 1은 사고파급방지보호장치의 적용범위를 보인것이다.

3. 사고파급방지 보호방식

3.1 주파수저하 보호방식

전력계통에서 1) 발전력이 집중된 발, 변전소의 사고로, 대전원이 계통에서 분리되는 경우, 2) 조류(潮流)가 큰 계통연계선(連系線)이 사고로 차단되는 경우, 3) 사고의 파급으로 대전원이 탈조하는 경우, 등이 발생하면 공급전력과 수요전력이 불균형 상태가 되며 계통 주파수가 저하되어간다. 그러나 이 주파수 저하에따라 부하도 감소하므로, 주파수는 수초 경과후에는 일정한 값으로 안정되는것이 일반이다. 이러한 경우에는 당연히 1) 출력에 여유가 있는 발전기의 출력을 급속히 증가시킨다. 2) 광역연계 송전선을 통해 타 전력회사에서 긴급 용원을 받는다. 3) 양수하기위하여 수전중인 양수발전

표 2. 화력기의 저주파수운전한도

운전 주파수	운전연속시간
58.5-59.0 Hz 이상	연속
58.5-58.0 Hz 이상	1분 이내
58.0-57.5 Hz 이상	30초 이내
57.5 Hz 이하	15초 이내

기를 긴급 차단시킨다. 등의 조치를 취하여 수급균형을 회복시킨다.

이러한 조치를 취하여도 끝내 주파수의 회복이 안되어, 저주파수로 운전하는 경우에는, 화력, 원자력발전소의 소내기기 출력저하에의한 발전출력 감소와, 발전기 터빈날개의 기계적손상 등 악영향을 주게되며, 발전기가 연속운전을 할 수 없게되어 계통에서 해열될 우려가 있다. 화력기의 저주파수운전한도는 일반적으로 표 2와 같다.

따라서 주파수 저하는 어떤 경우에도 57.5Hz 이하가 되지않도록 할 필요가 있으며 그 방법으로 저주파수 계전기(UFR, Under Frequency Relay)를 사용한 부하차단방식을 적용하는것이 일반이다.

계통 UFR에 의한 부하차단방식은, 전원탈락으

로 계통이 과부하로된 경우에 UFR로 계통주파수저하를 검출하여, 적합한양의 부하를 차단하므로써 주파수를 정상으로 회복시키는 방식이다. 부하차단을 지령하는 UFR와 한시계전기기를 두고, 부하제한량은 주파수저하정도와 그 계속시간에 따라, 3-5단계로 나누어 정정하여 차단하는것이 일반이며, 최대과부하조건에서는 3-5단계를 모두 차단토록 한다. 이 계통 UFR방식은 다음 사항을 기본으로하여 설계한다.

- 1) 예상되는 가장 가혹한 사고에 대해서도 화력기기의 운전한도주파수이하로 내려가지 않도록 한다.
 - 2) 계통동요에 의한 주파수저하 또는 상시상태에서 발생하는 주파수변동에는 절대로 동작하지 않도록 한다.
 - 3) 전원탈락후, 주파수저하에 따라 부하를 순차적으로 차단하며, 전원 탈락분과 차단량을 협조시키며, 부하차단량은 어떤 시각에서도 필요 최소한으로 한다.
 - 4) 차단부하는, 송전연계선 차단등이 생겨서 계통이 분리되었을때 지역적으로 편재되는것을 막기 위하여, 되도록 지역적으로 균등하게 배분한다.
- 위에서 말한 계통 UFR방식은 개별제어형이지만, 집중제어형시스템을 급전지령소에 설치하고, 여기서 계통주파수저하를 검출한후, 부하차단량을 계산하여 각 발, 변조에 차단지령을 보내어 차단하는 방식도 있으며, 이 경우에는 앞의 계통 UFR방식은 후비보호로 사용된다.

한편, 주파수상승이 생겼을때에는 이를 과주파수계전기(Over Frequency Relay)로 검출하여 적합한 양의 전원제한을 하는데, 주로 양수발전기 전원을 차단하는 방식을 적용하는 것이 일반이다.

3.2 탈조보호방식

전력계통이 안정운전을 하고 있을때에는, 각 발전기의 전기적 출력과 기계적 입력은 평형을 유지하고 있다. 이런때에 부하의 급변, 발전기의 트립, 송전선사고등의 계통동요가 발생하면 이 평형상태가 깨져서 발전기의 입출력에 차이가 생긴다.

이 차분의 에너지에 의해 동기기의 회전자는 가속 혹은 감속되어, 새로운 평형상태를 찾아서 상차각이 변화한다. 그러나 회전자에는 관성 에너지가 있으므로 상차각의 변화는 변동적이며, 아주 대폭

적인 변화를 하는 경우에는 원상태로 되돌아올 수 없어서 상차각은 점점 더 벌어져서 동기운전이 불가능해지고, 마침내 탈조해 버린다. 이탈조 상태가 계속되는 경우, 특히 대용량 발전기 상호간, 또는 연계계통간에 발생하는 탈조인 경우에는 대정전으로 진전될 가능성이 많다.

탈조사고대책의 기본은 1) 1차적 사고에 의해 2차적으로 탈조상태로 빠지지않도록 예측제어하는 탈조미연방지대책(脫調未然防止對策)과, 2) 부득이 탈조상태로 되었을 경우에는, 되도록 그 피해를 적게할 수 있는 대책, 즉 계통분리대책이다.

가. 탈조미연방지 보호방식

계통 직렬리액턴스의 감소, 중간조상설비(SVC 등)의 설치, 직류송전도입, 계통저항장치(System Damping Resistor)설치, 계통연계 및 발전기 속응여자방식체용 등은계통설비구성상의 문제가긴하지만, 탈조미연방지 대책중에 포함된다.

탈조미연방지 보호방식의 예를 그림 2에서 설명한다.

전원연계선 또는 계통연계선의 전력조류가 일정치 이상인 증조류시에 가혹한 사고가 발생할 경우, 고장제거후에 수급불균형이 커지면 탈조가능성이 있다. 이런때, 가속탈조이전에 적절한 점을 분리 또는 전원제한하여 탈조를 미연에 방지하는 방식을 탈조미연방지 보호방식이라한다. 그림 2는, 2회선

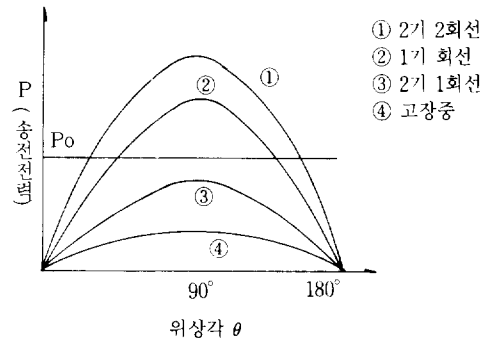
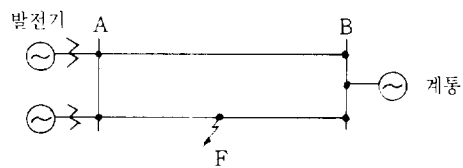


그림 2. 전원제한

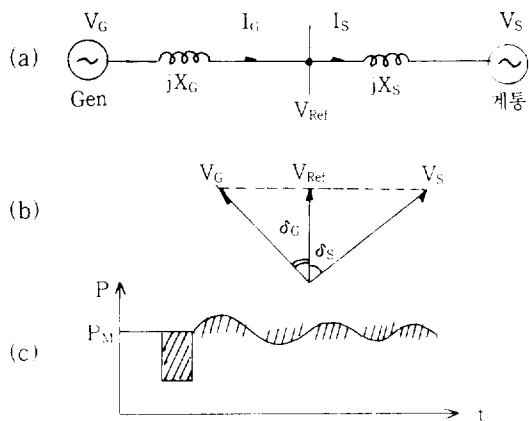


그림 3. 탈조예측계산

송전선에서 F점에 단락고장이 생긴 경우에, 전원제한의 유무에 따른 전력-상차각 곡선을 보인다. 2기 1회선 운전시(3)보다 1기 1회선 운전시(2)가 안정도면에서 더 유리하다는 것을 알 수 있다. 따라서 송전선 1회선이 사고로 차단되는 경우 여기에 맞게 발전기 1대를 차단하면 탈조를 비연에 방지할 수도 있음을 알 수 있다.

또 최근의 탈조미연보호장치의 예를 하나 더 들면, 대전원 발전단지에서 장거리 초고압송전선으로 부하지역에 대전력을 송전하는 경우에, 송전선사고가 발생하여 송전용량이 감소된때에 그대로 방치하면 탈조될 것이 예측되므로, 발전기의 전력변화를 온라인으로 받아서, 계통-발전기간 위상각차를 실시간연산하여, 그 값이 제한치를 초과하는지 판단한후 적절한 전원제한을 하는 예방제어방식이다. 즉, 그림 3(a)의 계통에서 사고전의 초기위상각을 아래식으로 계산한다(b).

$$\delta_{So} = \delta_G + \delta_S = (V_{Ref} - I_G \cdot X_G) + (V_{Ref} - I_S \cdot X_S)$$

여기서, 사고전의 전압 V_{Ref} , 전류 I_G, I_S , 임피던스 X_G, X_S 라한다.

다음에 사고후의 위상각변화의 연산을 아래식으로 연산한다. 이경우 발전기의 기계적입력은 일정하다고 보고 발전기의 유효전력 변화를 시간적분하여 위상각을 구한다(c).

$$\Delta\delta = 1/M \int (P_M - P_E) dt$$

여기서 M : 발전기 관성상수,

P_M, P_E : 발전기의 기계적입력, 전기적출력이 위상각변화에서 δ 를 예측한다. 즉,

$$\delta = \delta_{So} + \Delta\delta$$

이 δ 예측치와, 미리 Off Line Simulation.으로 구해놓은 안정도한계 위상각 δ limit를 비교하여 δ 예측치가 δ limit 보다 적으면 안정, 크면 탈조로 판정한다. 탈조로 판정되면, δ limit를 넘지않는 발전기 차단대수를 구하여 전송차단시키는 방식이다.

나. 탈조분리 보호방식

앞에 설명한 탈조미연방지방식을 적용하더라도, 또는 탈조하지않도록 계통설비를 강화하더라도, 여러가지 약조건이 겹치면 탈조하는경우가 생길 수 있다. 만일 그때 탈조를 방지하면 계통의 안정전으로 이어질것은 명백하다. 특히 일부 발전소가 탈조될 경우에도, 이를 그대로 놔두면 탈조는 점점 더 확대하는 성질이 있으므로 방지할 수 없으며, 탈조한 발전기는 계통에서 분리하지 않으면 안된다.

그림 4의 계통에서 가령 D 변전소 근방에서 단락고장이 발생하고 조건이 악화되어 탈조하였다고 가정한다. 이 경우에 탈조는 한 발전소의 탈조가 아니라 A,B,C 그룹의 발전기와 F,G,H 그룹의 발전기간이 탈조한것이 된다.

이때 그대로 방치하면 안되는것은 말할필요도 없으며 A,B,C 그룹과 F,G,H 그룹의 탈조이므로

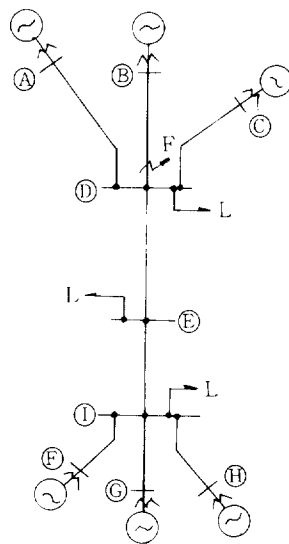


그림 4. 광범위 탈조

D-E간이나 E-I간에서 계통을 분리하면, A,B,C 그룹 발전기간에서는 탈조되지 않았기 때문에 그대로 운전을 계속할 수 있고, F,G,H 그룹내의 발전기도 마찬가지이다.

따라서 이와같은 그룹탈조인 경우에는 그 탈조의 중심점에서 계통을 분리하는 것이 대정전을 방지하는 유효한 수단임을 알 수 있다.

이와같이 탈조되었을때, 탈조중심점을 검출하여 거기서 계통을 분리하는 목적으로 쓰이는 계전기를 탈조분리계전기라고 한다.

탈조분리후에, 각 분리계통내에서는 전력수급의 불균형이 없어야 안정운전이 유지되는데, 일반적으로 수급균형이 유지되지않는것이 보통이므로, 분리후에 다시 수급균형을 잡는 전원제한이나 부하제한 등 후속대책을 동시에 실시하지않으면 안된다.

탈조분리시스템에 쓰이고 있는 탈조검출방법은 1) 임피던스 궤적검출형, 2) 송수전단 전압위상비 교형등이 있다. 임피던스 궤적검출형은 그림 5와 같이 Blinder특성의 거리계전기를 조합하여 거리계전기가 보는 임피던스가 영역을 1-2-3 또는 3-2-1의 순으로 통과하면 회복할 수 없는 탈조라고 판단하는 방법이다. 한편 전압위상비교형은 송전선의 상대단자의 전압순시치를 전송회선으로 수신하여 자기단자의 전압순시치와 비교하여 전압위상차를 산출하여 그 값이 180도 근처이면 탈조라고 판단하는 방식이다.

이 탈조분리계전기는, 장거리송전선의 송수전단 변전소나 기간송전선의 중요지점에 설치하여 탈조가 검출되면 선로를 차단 분리하는 방식을 많이 적용한다. 그러나, 계통이 복잡해지면서 탈조의 양상에 따라 여러개의 탈조계전기가 동작하는 경우도 있고, 또 모든 사고를 상정할때 일반적으로 탈조의 전기적 중심점이 일정한 장소로 고정되지 않는다는점

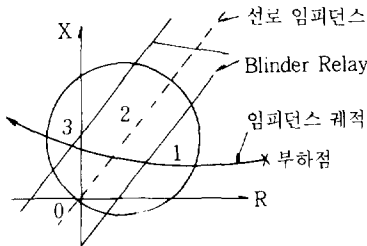


그림 5. 탈조검출방법

때문에 실제 적용에는 어려움이 있다. 이러한점 때문에 개별형탈조분리시스템은 발전소에서 계통에 송전하는 전원송전선에 설치하여, 그 발전기와 계통간이 탈조되는 경우에 탈조발전기를 분리하는데 적용한다. 계통내의 여러개 탈조계전기 동작을 신호 전송을 통해, Block 내의 한 변전소에서 받아서 이를 종합판단하여, 동작상황에 따라 미리 정한 최적의 분리점에서 분리하는 종합형탈조분리시스템을 적용하는 경우가 많다.

이상과 같이 탈조분리시스템은 매우 복잡하고 고도의 것이지만, 만일 이것이 오동작하면, 불필요한 계통분리로 큰 공급지장을 일으키고, 또 오부동작하면 전 계통이 붕괴할 우려가 있으므로 높은 신뢰도가 요구된다. 그래서 시스템자체의 신뢰성향상은 물론, 오동작에 대해서는 상시감시회로를, 오부동작에 대해서는 자동감시회로를 부가하여 이상부위의 조기발견을 도모하는것이 일반이다.

3.3 과부하 보호방식

전력수송설비에는 상시에 흘려도 좋은 전력조류의 한도가 정해 있으며, 이것을 운용한도라고 부른다. 이 값은, 통상적으로 일어날 수 있는 사고를 예측하여, 설비용량보다는 적고, 사고가 났을때에는 어느정도 과부하시킬 수 있는 값이다. 이 과부하는 통상의 급전조작으로 소요되는 시간동안은 견딜 수 있는것으로서, 이것을 전제로하여 운용한도가 정해진다. 예를 들면, 병행 2회선에서 회선 설비용량의 100%씩을 송전하고 있다가, 1회선이 사고차단되면 나머지 1회선에 2회선의 조류가 다 실려서, 선로설비용량의 200%가 흐르게 되면 급전조작 소요시간을 견딜 수 없게된다. 따라서 계통 절환등에 의한 과부하 해소능력을 고려하여 회선용량의 75%, 즉 2회선으로 1회선 용량의 150% 정도를 운용한도로 하고있다. 그러므로 송전선의 건설은 이 운용한도를 초과하지 않는것을 목표로 하고 있다.

그런데, 최근에는 용지사정등으로 전력수송설비의 증설, 신설이 예정대로 진행되지 못하게되므로서, 부득이 계통내의 각 설비가 중부하로 운전할 수밖에 없는 경우가 생긴다. 이와같은 상황에서 일부 설비가 사고정지하면, 남은 건전설비도 과부하가 되어, 이어서 이것도 정지하게되고 사고는 파급확대된다. 표 1에 나타내지 않았지만, 1965년 11월,

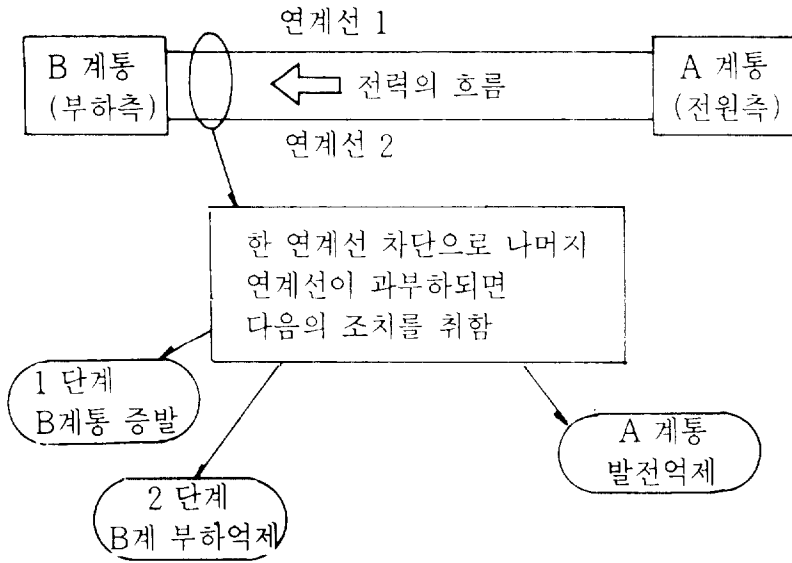


그림 6. 과부하 보호의 예

미국 북동부의 대정전사고(공급지장 4,300만 Kw, 최대정전시간 13시간)도 송전선의 과부하 정지가 시발이었다. 이렇게 과부하에 의한 과급사고는 계통에 중대한 영향을 줄 수 있으므로 과부하 보호방식의 적용은 필요하다.

과부하 보호방식은 일반적으로 송전선이나 변압기에 적용하는데, 과부하 보호의 개념을 송전선에 예로하여 설명한다.

계통의 기간 송전선의 일부가 사고로 차단되면, 다른 회선이 과부하로 되며 이 상태로 송전을 계속하면 선로가 과부하로 용단되는 중대사고로 진전될 수 있다. 그러나 단지 과부하 송전선의 보호만을 고려하여, 그 선로를 차단하면 계통이 분단되거나 또는 나머지 다른 회선의 과부하를 유발하여 전계통으로 과급될 우려가 있다.

이러한 과부하에 의한 사고과급 방지에는 그림 6과 같이 과부하된 선로의 조류가 적어지도록 적절한 전원제한 또는 부하제한을 하여 대처하는 방식을 써야 한다.

일반으로, 송전선에서 150%의 과부하이면 10분 이내에 과부하를 해소하지 않으면 위험하며, 200%의 과부하이면 약 5분 이내에 단시간허용온도인 120도에 달한다. 이러한 경우에는 급전조작으로 과부하를 해소하는것은 거의 불가능하므로, 자동적으로

과부하를 해소할 수 있는 과부하 보호방식으로 대처해야 한다. 변압기의 경우도 비슷하여, 150%의 과부하이면 10-15 분이내에 급전조작으로 과부하를 해소해야 하고, 그 이상의 과부하에는 과부하제어시스템으로 자동적으로 과부하를 해소하지 않으면 안된다.

한편, 광범위한 전압저하문제는 최근에 부하된 것으로서, 표 1에서 보인 87년 7월, 일본 동경 정전사고를 계기로 세계적으로 주목되었으며, 본격적인 대처방안은 이제부터의 과제가 될것으로 보인다. 저전압계전기 또는 전압변화율 검출 계전기로 전압저하를 검출하고 적합한 부하제한을 하는 방식을 적용하는 전력회사(동경전력)도 있다.

4. 맺음말

전력계통에서 설비사고는 불가피한것으므로 계통의 안정운용을 위해서, 보호계전시스템은 필요 불가결한 것이며 설비사고의 신속한 제거는, 설비손상을 줄이고 정전구간을 감소하며 계통안정도향상에 도움을 준다. 그러나 전력시스템은 점점 더 방대하고 복잡해져서 대용량 발전설비의 집중화, 지역 편재화, 송전선 건설용지의 확보난 등에 의해 대전력수송이 필요해지고 전력소송설비의 전력용량여유

가 적어져서 계통안정도면에서 가혹한 상태로 운전해야할 국면에 들어서고 있다. 이러한 상황에서는 계통사고가 파급되어 주파수저하, 탈조, 설비 과부하 등에 의한 대정전사고로 진전될 가능성이 커지고 있다.

이런 관점에서, 우리계통에도 적절한 사고파급방지보호장치의 설치가 필요하다고 생각되며, 외국에서는 벌써부터 여러가지 사고파급보호방식을 적용하고 있다. 예를 들면 주파수저하와 수급균형제어를 주목적으로한 계통안정화장치(System Stabilizing Controller), 계통안정화제어장치(Block System Stabilizer) 등이다.

또 다른 관점에서 보면 적합한 계통안정화장치를 설치운용함에 의하여, 전력설비에, 과도안정도한제치에 가까운 전력을 실려서 설비운용의 효율화와 건설비의 억제등 효과를 얻어, 전력계통의 운용합리화를 기할 수 있다고 생각한다.

외국의 대정전사고의 예는 이제 강건너 불이아니

며, 우리에게도 언제 닥칠지 모르는 심각한 현실로 다가오고 있다. 우리도 계통안정화장치에 관한 구체적인 적용방법을 연구하고, 적용할 시기라고 생각된다.

이 글이, 이 방면에 관심을 가진 학회회원들에게 다소나마 도움이 되었으면 하고 바란다.



신대승(辛大承)

1933년 6월 10일생. 1961년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(석사).

1961년~77년 한국전력공사 근무. 1977년 전기 기술사 취득. 현재 전기연구소 연구위원. 당학회 조사이사.