

외란으로 인한 주파수 저하시 계통구성 요인에 따른 특성 분석

장병태^{*} 이소영^{*} 이재욱^{*} 조경보^{*} 곽노홍^{*} 안정식^{*} 이금진^{*}
^{*}한전 전력연구원 ^{*}한국전력거래소

Analysis of characteristics at the various conditions of power system in case of frequency decrease due to disturbances

B. T. Jang^{*}, S. Y. Lee^{*}, J. W. Lee^{*}, K. B. Cho^{*}, N. H. Kwak^{*}, J. S. Ahn^{*}, G. J. Lee^{*}
^{*}KEPRI ^{*}KPX

Abstract - When generators trip on the occurrence of disturbance, the power system frequency declines by the amount of difference between demand and supply due to the imbalance between power generation and load. Even though the power system is operated with the same grid structure, generating capacity, and load, the resulting frequency decline and its recovery slope show different aspects according to the inertia constants of generators, spinning reserves, and the speed adjusting rates at the governors. From this point of view, we analysed differences of frequency decline at the various conditions in domestic power system.

1. 서 론

전력계통 주파수 품질이 저하된 경우에는 산업용기기의 운전상태가 변화되어 제품의 품질에 치명적인 문제를 일으킬 경우가 있으며 산업 활동을 비롯하여 우리들의 생활에 영향을 미치게 된다. 한편, 계통운용의 관점에서 보면 전력계통은 다수의 동기발전기가 동기속도로 병렬하여 계속해서 변화하는 거대한 시스템이다. 이 거대한 시스템에 있어서 계통주파수가 계통 사고등의 외란에 의해 동요가 생긴 경우에는 이들의 발전기의 계속운전에 영향을 미치게 된다. 경우에 따라서는 신뢰도가 현저히 저하되기도 하고 최악의 케이스로써 계통붕괴에 까지 미치면 그 사회적인 영향은 헤아릴 수 없을지도 모른다. 따라서 전력계통의 정상시 및 긴급시에 있어서 주파수를 적절하게 제어하는 것은 우리 생활에 필수적인 전력품질을 유지하는데 있어서 더없이 중요한 역할을 달성하고 있다고 말할 수 있다. 계통운용자 및 전기사업 참가자는 이 중요성을 인식하면서 전력계통의 운용에 대해 효율성과 신뢰성을 추구하여야 한다. 본 논문에서는 전력계통에 외란이 발생하여 발전기 탈락시 발전량과 부하량의 수급 불균형으로 인하여 수급차이만큼 계통주파수는 저하되는 경우의 계통 구성요인과의 상관관계를 분석하였다. 동일한 계통선로 구성과 발전력 및 부하량으로 운전중인 계통이라 할지라도 발전기 관성정수의 크기, 순동예비력의 크기, 조속기 속도 조정용 크기에 따라 주파수 저하 및 회복의 기울기는 달리 나타난다. 국내 전력계통을 대상으로 각각의 항목의 크기를 다양하게 변화시켜 주파수 저하의 정도 차이를 분석하였다.

2. 본 론

2.1 계통운용 예비력

예비력이란 전력계통에 외란 발생시 혹은 부하 증가시에 있어서도 전력공급을 안정적으로 확보하기 위해 수요를 상회하여 보유하는 공급력이고 그 필요량은 공급력과 수요의 차이가 날마다 변하는 데에 대응하여 변화한다. 일상 운용 측면에서 예비력을 분류하면 날마다 수요변동에 따라 변화하는 실제의 수급상황에 맞춰서 어떤 형태

로 보유하는가에 따라 대기예비력, 운전예비력, 순동예비력으로 구분할 수 있으며 나라마다 용어가 일부 다르지만 일반적인 예비력의 정의를 표 1에 나타내었다.

표 1. 예비력의 정의

| 분류 | 예비력 정의 |
|--------|--|
| 대기 예비력 | 기동으로부터 전체부하를 취할 때까지 수시간을 요하는 공급력 |
| 운전 예비력 | 즉시 발전 가능한 것과 단시간 내(10분정도 이내)에 기동하여 부하를 취하고 대기 예비력이 기동하여 부하를 취하기까지 계속해서 발전할 수 있는 공급력 |
| 순동 예비력 | 전원탈락시 주파수저하에 대해 즉시로 용동을 개시하고 급속히 출력을 상승하고(10초정도 이내) 적어도 순동 예비력 이외의 운전 예비력이 발동되기까지의 시간, 계속해서 자동 발전 가능한 공급력 (운전중의 발전기의 가버너 프리 여력) |

전력계통에서 주파수 변동, 각종 예비력의 기동 시나리오를 전개하면 대규모 전원탈락이 발생한 경우 순동예비력이 바로 용동하여 주파수저하를 가능한 완화시킨다. 순차적으로 순동예비력 이외의 운전예비력을 가동하여 규정주파수인 정상 운전범위내로 주파수를 상승시킨다. 다음으로 대기예비력을 가동하여 운전예비력의 보유량을 사고 전의 상태로 회복시킨다. 순시성의 부하변동과 전원탈락 사고 등 극히 단시간 내에 생기는 수급 불평형은 수십분 내지 수시간 중에 기인한 공급력의 조정이 충족되지 않기 때문에 즉각적인 공급력 조정기능을 필요로 하게 된다. 이러한 즉응적인 공급량 즉 순동 예비력으로써의 필요량은 계통주파수의 안정유지에 대한 사고방식 및 계통 전원 구성 등의 조건에 따라 정해진다. 이것에 대해 계통규모의 확대, 계통용량의 증대, 전원의 집중화 등 주파수제어를 둘러싼 환경은 시대의 함께 변화하여 이것에 맞추어 순동 예비력의 필요량을 재평가 할 필요가 있다. 순동 예비력과 관련된 가버너 프리 필요량을 정의해 보면 전원탈락시 주파수저하에 대해 즉시 용동을 개시하여 주파수가 최저에 달하는 수초정도 까지 급속히 출력을 상승시키고 적어도 순동 예비력 이외의 기타 예비력이 발동되기까지 계속해서 자동발전 가능한 공급력 및 상시의 단주기 부하변동에 대응하기 위한 조정력으로 기술한다. 결국, 순동예비력은 순동예비력으로써 확보하는 가버너 프리량과 상시의 단주기 부하변동을 억제하는 데에 필요한 가버너 프리량(운용여유분)을 합해 가진 예비력으로써 정의된다. 순동예비력은 가버너 프리 용량과 동일하다고 말할 수 있다. 전력계통 외란으로 인하여 주파수 저하시 계통이 보유하고 있는 순동예비력 크기와 주파수 회복과의 상관관계를 분석하기 위하여 국내계통 실제통 데이터(계통부하 22,349MW)를 이용하여 전력계통 해석 프로그램(PSS/E)을 활용, 분석한 결과를 그림 1에 제시하였다. 또한, 이 때 사례별 순동예비

력 크기를 표 2에 제시하였다. 순동예비력이 클수록 정상 주파수 범위로 빠르게 회복됨을 보여주고있다.

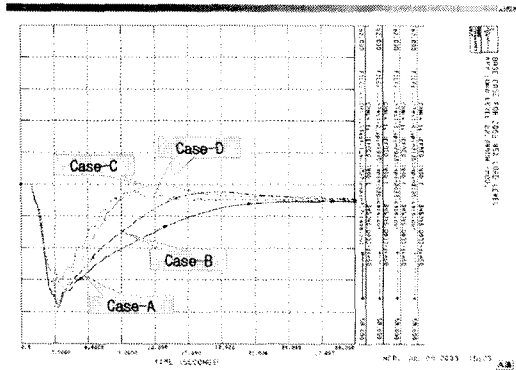


그림 1. 순동예비력 크기와 주파수 응답 관계

표 2. 순동예비력 크기

| 분류 | 순동예비력 크기 | 분류 | 순동예비력 크기 |
|--------|----------|--------|----------|
| Case-A | 727 MW | Case-C | 2,033 MW |
| Case-B | 1,030 MW | Case-D | 3,135 MW |

2.2 계통정수

전력계통에서 계통주파수특성 K 는 부하주파수특성 K_L 및 발전기 주파수 특성 K_G 의 합으로 구성된다. 단, 발전기 탈락 등의 요인으로 주파수가 대폭으로 저하하여 그 결과 가버너 프리 발전기의 출력이 상한으로 도달한 경우 계통주파수특성은 부하주파수특성만이 된다. 즉, 계통주파수특성은 가버너 프리 발전기가 운전여력을 전부낸 시점까지는 $K=K_L+K_G$ [%MW/%Hz]로 나타나며 운전여력을 전부낸 후에는 $K=K_L$ [%MW/%Hz]로 나타낸다. 이것을 그림으로 하면 그림 2와 같이 된다.

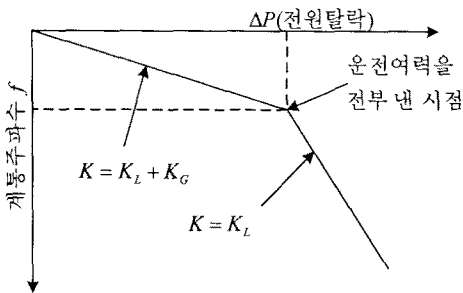


그림 2 계통주파수특성

계통부하특성은 부하기의 구성에 따라 다르다. 장기적인 시점에서는 앞으로 인버터 제어기의 보급에 따라 부하의 주파수특성정수 K_L 은 작아지는 경향이 있고 부하의 자기제어성은 앞으로 작아지는 추세라고 판단된다. 더하여 단기적인 시점에서는 시간대와 계절마다 부하의 주파수특성정수는 변화한다. 이 때문에 단·장기적 시점 양면으로부터 새로운 계통부하특성의 실태를 파악하면 보다 정밀도가 높은 K_L 의 값을 계통주파수 정책에 반영시킬 수 있다. 부하변동특성도 부하기의 구성에 따라 다르다. 즉 특정한 수용가의 부하변동이 심하기 때문에 그 부하기의 비율이 높아지면 부하 변동량도 커진다.

심야대 등 발전기의 가버너 프리량과 부하주파수 조정용량의 확보가 곤란한 시간대에서는 이러한 심각한 부하변동이 계통주파수 변동에 강한 영향을 미치고 있다고 판단된다. 따라서 부하변동의 특성을 계속해서 분석·조사하고 그 변동량과 변동주기 등을 정밀도 높게 파악하면 보다 효과적으로 주파수를 제어할 수 있다고 판단된다. 현재는 계통정수 설정치를 고정치를 이용하여 부하주파수제어 정책에 반영하고 있지만 실제로는 전원구성과 운전상태에 따라 가버너 프리에 의한 조속특성이 변화하기 때문에 발전기 특성정수 K_G 는 변동하고 또 시각에 따라 부하특성정수 K_L 도 변동하기 때문에 그것들의 합인 실제의 계통주파수특성도 시시각각 변동하고 있다. 따라서 계통정수 K 는 시시각각 변화하기 때문에 계통정수의 값을 정확히 추정하는 것은 대단히 곤란한 문제이다. 일반적으로 계통정수 값은 전원, 부하탈락과 가버너 커트 시험시 등의 실측 결과를 근거로 하여 설정되고 있다.

2.3 발전기 관성정수

발전기 관성정수에 관한 효과를 분석하기 위하여 실제 동역학 데이터의 다른 요소들은 변경하지 않고 H 값만을 변화시켜 주파수 응답과의 관계를 분석하였다. 분석결과는 그림 3에 제시하였으며 이때 사례별 H 값을 표 3에 제시하였다.

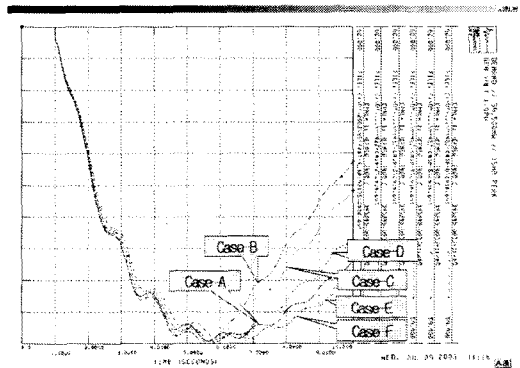


그림 3. 발전기종합관성정수 크기와 주파수 응답 관계

표 3. 발전기종합관성정수(H_T) 크기

| 분류 | H_T 크기 | 분류 | H_T 크기 |
|--------|----------|--------|----------|
| Case-A | 4.12 | Case-D | 4.42 |
| Case-B | 4.22 | Case-E | 4.52 |
| Case-C | 4.32 | Case-F | 4.62 |

H 값은 앞서 언급한 바와 같이 관성 기율기에 직접적으로 영향을 미치고 있음을 그림 3에서 명확히 보여주고 있다. 주파수 응답에 미치는 파라미터들이 많이 있지만 일반적인 주파수제어 블록도를 살펴보면 다른 파라미터들은 피드백 파라미터들인데 H 는 Feed-Forward Loop에서만 포함되는 특징을 가지는 파라미터다. 높은 값의 H 일수록 초기 주파수 저하 기율이 상대적으로 덜 감소하는 관계가 있다. 그리고 최대 이탈을 지연시키거나 감소시킨다. H 는 최종 정상상태 주파수에는 영향을 미치지 않는다. 관성값이 높아질수록 주파수의 저감은 늦어진다, 그리고 회복 속도 또한 늦어진다. 높은 관성에 의해 응답이 늦어짐에 따라 조속기는 응답할 수 있는 시간을 더 가질 수 있다. 그러므로 최대주파수 이탈의 한계는 보다 낮은 값을 가진다.

[참 고 문 헌]

2.3 조속기 속도조정을

조속기는 발전기 회전수(주파수)가 상승하면 발전기의 입력을 감소시키고 주파수가 감소하면 발전기로 들어가는 입력을 증가시키는 것 역할을 담당하고 있다. F_N 을 규정 주파수(정격 회전수), F_0 를 무부하시 회전수라 할 때, 발전기의 속도를 조정하는 조속기의 속도조정을 (Speed Regulation) 'ε'은

$$\epsilon = \frac{F_0 - F_N}{F_N} \times 100\% \quad [1]$$

식으로 표시된다. 속도조정을 'ε'은 다음과 같은 조속기의 조정 성질을 나타낸다. 속도조정이 작으면 작을수록, 작은 주파수 변화에도 발전기의 입력 또는 출력이 크게 변하는 것을 의미한다. 즉 발전기 자체의 안정된 운전보다는 전체 전력계통의 목표 주파수 유지에 유리하다. 반면에 속도조정이 크면, 큰 주파수 변화에도 발전기의 출력이 적게 변하는 것을 의미하며 발전기 한 대로 볼 때, 전력계통의 주파수 변화에도 안정되게 운전 할 수 있음을 나타낸다. PSS/E 실제통 다이내믹 데이터에서 속도조정을 값을 다양하게 변화시켜 주파수 응답과의 관계를 분석하였다. 그림 4는 그 결과를 제시하고 있으며 표 4는 사례별 속도조정을 값을 나타내고 있다.

[1] KEPRI, "전력계통 안정도를 고려한 계통보호 대책 연구", 2002. 12
 [2] 이소영 외, "주파수 변화율을 이용한 동적 부하차단 방안", 전기학회 논문지, 제52권 6호, 2003년
 [3] 일본전기학회, "전력계통에서의 상시 및 긴급시의 부하주파수제어", 전기학회기술보고 제869호, 2002. 3
 [4] KPX, "적정 운전예비력 확보기준 및 확보량 산정에 관한 연구", 2002. 10
 [5] P. M. Anderson, "Power System Protection", 1999
 [6] 한국전력공사, "적정주파수 관리방안 및 주파수 유지율이 산업계에 미치는 영향조사", 1999.11
 [7] H.E.Lokay and V. Burtnyk, "Application of Underfrequency Relays for Automatic Load Shedding", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-87, No. 3, pp 776-783, March 1968

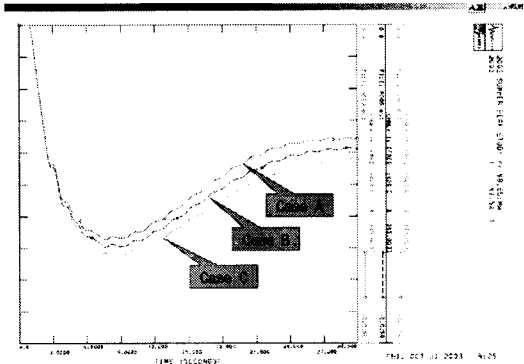


그림 4. 조속기 속도조정과 주파수 응답 관계

표 4. 속도조정을 크기

| 분류 | 속도조정을 크기 | 분류 | 속도조정을 크기 |
|--------|----------|--------|----------|
| Case-A | 0.03 | Case-C | 0.07 |
| Case-B | 0.05 | - | - |

Governor Droop의 효과를 보여 주기 위해서 R의 값을 0.03에서부터 0.07으로 변화시켰다(변량:0.02). 그 결과 가 정된 Droop Setting R은 주파수저감의 초기비에는 절대적으로 영향이 없음을 보여주고 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 전력계통에 외란이 발생하여 발전기 탈락시 발전량과 부하량의 수급 불균형으로 인하여 수급차이만큼 계통주파수는 저하되는 경우의 계통 구성요인과의 상관관계를 분석하였다. 동일한 계통선로 구성과 발전력 및 부하량으로 운전중인 계통이라 할지라도 발전기 관성정수의 크기, 순동예비력의 크기, 조속기 속도 조정용 크기에 따라 주파수 저하 및 회복의 기술기는 달라 나타난다. 국내 전력계통에 외란이 발생하여 주파수저하시 이의 현상을 분석하고 대책 마련시 이런 계통구성 요인들을 외란발생 당시의 계통운용에서 실제적으로 반영 하므로써 보다 정밀한 해석과 계통의 안정화 보호 대책이 마련될 것으로 기대된다.