

터빈-발전기 부하 탈락 시 발생하는 과도현상 고찰

김종안, 우주희, 최인규, 김병철  
한국전력공사 전력연구원

A study on the transient state when a Generator Load Rejection takes place

Kim Jong-An, Woo Joo-Hee, Choi In-Kyu, Kim Byoung-Chul  
Korea Electric Power Research Institute

**Abstract** - 터빈-발전기가 안정적인 운전상태에서 갑자기 부하를 상실하면 속도가 상승하게 된다. 탈락되는 부하의 크기가 클수록 속도 상승은 문제가 된다. 본 논문은 발전기 부하 탈락 시의 에너지 불 평형과 속도 상승, 그리고 과속을 예측하여 미리 터빈 증기를 차단하는 제어방식 그리고 안정도 향상 방안에 대하여 고찰한 내용을 정리한 것이다.

1. 서 론

우리가 사용하는 전기는 거의 모두 3상 동기발전기에 의해 생산된다. 발전기는 기계적 회전에너지를 전기에너지로 변환하는 장치이며, 회전에너지 공급원으로 증기터빈이 가장 많이 사용되고 있다. 전력 계통에 병렬로 연결된 각 발전기는 전기공급의 안정성 확보와 송전손실 감소 등을 목적으로 전국에 분산되어 있다. 넓은 송전망에는 여러 가지 사유로 순간 고장이 발생하고 해소되는 경우가 많다. 차단기가 동작하면 터빈-발전기에는 과도 현상이 발생한다. 제어시스템은 터빈을 과속으로부터 보호하고 전력공급의 안정성도 유지하는 기능을 수행해야 한다. 부하 탈락 전후 에너지 평형과 가속도의 관계, 불 평형 검출 그리고 과속 예방 알고리즘이 요건이다.

2. 본 론

2.1 터빈과 발전기의 관계

화력 또는 원자력 발전소의 증기터빈은 발전기를 구동하기 위한 1차 동력 변환 장치이다. 터빈과 발전기는 기계적으로 한 축에 연결되어 있고, 발전기는 이 축을 통하여 회전 토크를 전달받는다. 보일러(또는 증기발전기)에서 생산된 증기가 터빈에 유입되면, 터빈은 증기가 보유한 열역학적 에너지를 기계적 회전운동으로 변환한다. 발전기는 터빈에서 공급한 기계적 에너지를 전기에너지로 변환하며, 변환 과정에서 이용되는 매체는 자계(magnetic field)이다. 발전기 고정자(stator)에서 전기를 생산하여 부하 측에 공급하면, 즉, 전류가 흐르면 전류의 크기에 비례하는 회전 자계가 공극에 발생한다. 이 회전자계가 기계적으로 회전하는 계자(Rotor)의 자계사이엔 인장력이 작용하며 이 힘은 터빈의 구동력과 반대 방향이며 제동력으로 작용한다.

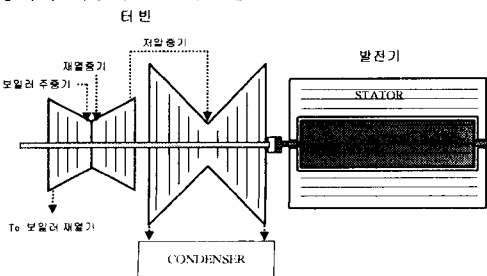


그림 1. 터빈-발전기의 기계적 결합

2.2 터빈-발전기의 회전운동 에너지

터빈-발전기가 안정된 상태로 운전되는 경우에 터빈의 구동 토크  $T_i$ 와 발전기 내의 전자기적(Electromagnetic) 토크  $T_e$ 는 크기가 같고 작용하는 방향이 반대이다. 터빈-발전기의 토크(Torque)와 각속도, 동력(Power)의 관계는 다음의 관계가 있다.

$$T_i = T_e, T_i \omega = T_e \omega$$

$$P_i = T_i \omega, P_e = T_e \omega$$

여기서,  $P_i$ 는 터빈에서 발생하는 동력이며,  $P_e$ 는 발전기에서 외부에 공급하는 전력의 크기와 같다.

2.2.1 작용 토크와 각 운동량 변동

터빈의 구동력과 발전기의 생산전력이 같은 크기이면, 즉,  $P_i=P_e$ 이면, 회전체의 각운동량은 시간에 따라서 변화하지 않는다(손실을 무시하였음). 작용하는 토크의 크기와 회전체의 각운동량(Angular Momentum)  $M$  관계는 다음과 같다.

$$\tau = dM/dt \dots \dots \dots (1)$$

또한 각 운동량  $M$ 은 관성모멘트를 사용하여 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$M = I \omega \dots \dots \dots (2)$$

여기서,  $I$  = 관성모멘트(Inertia Constant)[kg·m<sup>2</sup>]

$$\omega = \text{각속도(Angular Velocity)}[\text{rad/sec}]$$

각변위는  $\theta$ (radian), 각속도는  $\omega$ (rad/t), 각가속도는  $\alpha$ (rad/t<sup>2</sup>)로 표시한다.

식(1)과 식(2)로 부터 관성모멘트가 일정한 계에서는

$$\tau = I \cdot d\omega/dt = I\alpha \dots \dots \dots (3)$$

라고도 쓸 수 있다. 여기서  $\alpha (=d^2\theta/dt^2)$ 는 각가속도이다.

2.2.2 관성 모멘트

여러 개의 입자로 구성되어 있으면서 입자 사이의 상대적인 위치가 고정되어 있는 계의 경우, 어떤 축에 대한 관성 모멘트는

$$I = \sum m_k r_k^2 \dots \dots \dots (4)$$

여기서  $m_k$ 는  $k$  번째 입자의 질량이고,  $r_k$ 는 축으로부터 그 입자까지의 직선거리이다. 질량이 균일하게 분포되어 있는 강체의 경우에는

$$I = \int r^2 dm \dots \dots \dots (5)$$

관성모멘트  $I$ 는 회전체가 회전하고 있는 동안 보유한 에너지의 크기이며, 그 값이 크면 각 운동량을 변화시키기 어렵다. 즉, 작용하는 힘의 변동에 대해 회전수 변동을 억제하려는 속성이 크다.

2.2.3 발전기의 부하 감소

터빈-발전기가 에너지 평형을 이루고 있는 상태에서 발전기의 부하가 감소한다면 발전기 공급의 자기적 결합이 느슨해지고, 만약 터빈 측 구동력이 감소하지 않는다면  $P_i > P_e$  이고, 결과로서 터빈-발전기의 각운동량 즉, 속도가 변하게 된다. 가속에너지  $P_a$ 와 속도상승의 관계를 살펴본다.

$$Pa = Pi - Pe = L a \quad (\text{여기서 } a = d^2\theta/dt^2) \dots\dots\dots(6)$$

$$M = I \omega \quad \text{이므로,}$$

$$Pa = Pi - Pe = M a = I \omega \quad d^2\theta/dt^2 \dots\dots\dots(7)$$

발전기 부하가 감소함에도 불구하고 터빈에 들어가는 증기량이 감소하지 않는다면 속도가 계속 상승하여 위험한 상황에 처할 수 있다.

### 2.3 발전기 부하 증감에 대응한 터빈제어

터빈을 제어하는 장치 즉, 터빈제어시스템에는 일상적인 발전기 부하 증감에 자동 응답하도록 그림 2와 같은 속도-부하 관계 기울기가 들어 있다. 터빈의 회전속도와 전기주파수는 비례하며 다음 관계가 있다.

$$\omega = 2\pi f/P[\text{rad}] \dots\dots\dots(8)$$

$$N = 60 \cdot 2\pi f/P[\text{rpm}] \dots\dots\dots(9)$$

여기서, P는 발전기 계자의 자극(Pole) 수이다. 발전기 부하 감소 전 안정된 상태의 운전점이 A(L1, f1) 이고, 부하가 감소하여 터빈의 속도가 상승하면 터빈의 증기량을 감소시켜서 C(L3, f3)점에서 새로운 평형을 이룬다. 부하가 증가하면 반대로 B(L2, f2)점에 운전된다. 즉, 속도를 입력으로 하는 비례제어가 이루어진다.

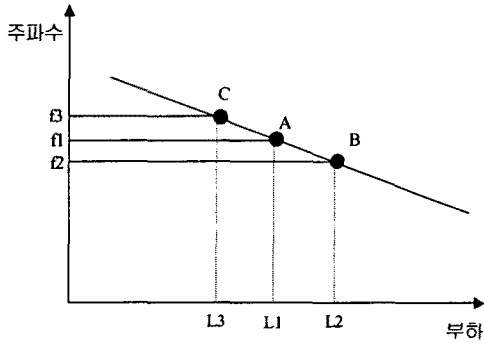


그림 2. 터빈의 속도-부하제어 기울기

#### 2.3.1 병렬운전 중인 발전기 부하 분담

병렬 운전 중인 모든 터빈-발전기가 그림 2와 같은 속도-부하 제어기능을 갖고 있다면 자연스럽게 전기 주파수에 대응하는 출력 분담과 제어를 할 수 있다.

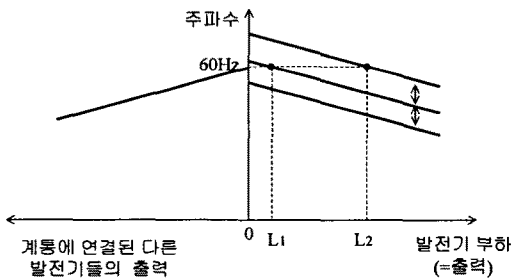


그림 3. 병렬운전 중의 발전기 부하 조정

정격주파수로 유지되고 있는 상태에서도 속도-부하 기울기를 상하로 이동시키면 터빈의 출력을 임의의 변경할 수 있다.

### 2.4 발전기 부하 탈락

발전기 보호장치의 동작 또는 송전선로에 고장이 발생

하면 차단기가 동작하여 큰 부하가 갑자기 탈락하게 된다. 터빈-발전기에는 순간적으로 큰 에너지 불평형이 생기고 급하게 가속된다.

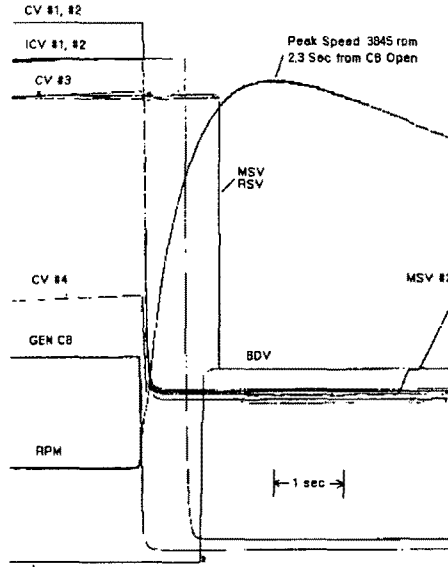


그림 4. 큰 부하가 탈락한 경우 터빈-발전기 속도상승

위 그림 4에서는 부하 탈락 즉시 터빈의 증기 밸브가 즉시 닫혔으나 내부 잔류증기가 팽창하므로 가속이 일어났다. 부하 탈락은 아주 짧은 시간에 일어날 수 있으므로 2.3항에 기술한 보통의 속도-부하 제어기능 만으로는 신속하게 대응할 수 없다. 즉, 보통의 속도-부하 제어기능의 시정수는 수 초 정도로서, 속도를 감지하여 대응하는 피드백 제어방식으로는 터빈-발전기의 최고 속도를 안전 범위 내로 유지하기 어렵다. 급속한 부하탈락을 검출하여 미리 터빈의 증기량을 차단하는 예측제어 방식이 필요한 것이다. 최근의 터빈제어시스템에는 이와 같은 기능을 거의 채용하고 있다.

#### 2.4.1 발전기 부하 산출

발전기 출력  $Pe$ 는 다음과 같이 표시할 수 있다,

$$Pe = \sqrt{3} V I \cos\theta \dots\dots\dots(10)$$

여기서, V : 발전기 단자 간 전압,

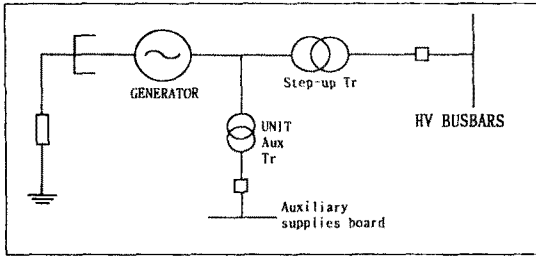
I : 발전기 상 전류

$\theta$  : 단자 전압과 전류와의 위상각 차이

모든 발전기에는 전압과 전류의 검출하는 계기를 구비하고 있으므로 이들 계기의 신호를 이용하면 출력을 실시간으로 산출하여 얻을 수 있다. 터빈-발전기의 과속이 예상되는 큰 부하 탈락을 검출한다면 미리 터빈의 증기를 신속히 차단하여 과속을 억제할 수 있다. 발전기의 출력은 전력계통의 상태에 따라 동요할 경우가 많은데, 터빈-발전기의 신속한 보호와 더불어 안정도 확보도 고려해야 한다.

#### 2.4.2 전력계통 고장과 발전기 출력

송전 선로에 단락 또는 지락 고장이 발생하는 경우 발전기 측에서 공급하는 전류는 감소하지 않고 전압이 크게 감소할 수 있는데, 이 경우 식(10)에 의해 산출되는 출력 값도 크게 감소한다. 그러나 발전기 전류가 감소하지 않는 한 발전기 내 공급 자체의 상호 작용에 의한 인장력(제동력)은 변치 않으므로 터빈-발전기가 과속되지는 않는다.



Generator - Transformer unit

그림 5. 송전 선로에 접속하는 발전기-승압변압기 구성

### 2.4.3 송전계통 고장 발생과 자동복구

송전선로의 고장은 수목 접촉이나 낙뢰로 인한 일시적인 지락 고장이 대부분이다. 만약 고장전류를 일시 차단한다면 고장 점의 아크(Arc)가 자연히 소멸되고 절연이 회복되는 경우가 많다. 보호계전기 고장상태(전류)를 검출하여 선로 양단의 차단기를 개방시킨 다음 일정시간(15Hz~48Hz) 기다렸다가 차단기를 자동적으로 재투입하는 것을 자동 재폐로라고 하며, 재폐로의 성공률은 약 75% 정도로 알려져 있다. 이 방식의 채용으로 고장 구간 최소화, 고장확대 방지, 자동복구, 안정도 향상을 도모한다.

### 2.4.4 고장 자동복구에 대비한 보완

재폐로 성공으로 송전선로의 고장이 1초 이내 자동 복구된다고 가정하면, 고장 즉시 터빈을 무부하 상태로 만드는 것은 고장복구 시 재송전 요구에는 신속히 응할 수 없다. 부하 탈락 검출 기능에 다음과 같은 보완 방법을 생각할 수 있다.

1) 발전기 출력산출 식  $P_e = \sqrt{3}VI\cos\theta$ 에서 V와 I를 모두 사용하는 대신 전류 I만 취하여  $P_e$ 의 근사 값이 되도록 보정(Scaling)한다면, 고장전류 I가 존재하는 상태에서는 부하탈락으로 보지 않는다. 즉, 전압 변동분은 발전기 출력산출에서 배제한다는 것이다. 고장이 지속되어 보호계전기 동작으로 차단기가 동작하면 그 때 전류가 차단되므로 부하 상실로 받아들인다.

2) 전류가 상실되더라도 터빈의 증기 공급을 즉시 완전히 차단하지 않고 수 십 mS 수준의 시간 지연-터빈이 허락하는 시간을 두어 자동복구를 기다리는 방법이다.

3) 고장 즉시에는 증기량의 일부(예 70% 유량)를 차단하고, 수 십 mS 수준의 시간지연 후 완전차단 하는 조합하는 방식을 들 수 있다.

### 2.5 터빈 구동력의 대표 값

터빈의 출력 즉, 구동력으로는 터빈 각 단에서 팽창 중인 증기압력을 사용하는데, 고압 터빈 첫 단 하류 측 이후의 각 단 증기 압력은 터빈 출력과 근사적으로 비례하는 것으로 알려져 있다. 국내 발전소에서는 터빈 중압(Intermediate Pressure) 단 입구 측 재열증기 압력을 가장 많이 사용하고 있다.(그림 1 참조).

### 2.6 기타 과속도 예측 변수

#### 1) 각 가속의 증가

터빈 구동력과 발전기의 억제력에 차이가 발생하면 식 (3)에 의해 가속이 발생한다. 가속율이 일정크기를 벗어나고 정상적인 속도제어 범위를 초과한다고 판단되면 증기를 급속히 차단한다. 이 결과로 감속이 된다면 다시 정상적인 속도제어 기능에 주도권을 넘겨준다.

#### 2) 차단기 동작

차단기의 보조접점을 입력으로 받아들여 차단기 동작 여부를 감시하고 있다가, 차단기가 개방되면 터빈의 증

기를 즉시 차단시킨다.

### 3. 결 론

근래의 설계되는 터빈-발전기 용량은 커지는 추세이나 단위 용량 당 질량은 가벼워진다. 회전체가 가벼우면 관성모멘트가 적어 발전기 부하가 탈락 시 회전수 상승이 더 문제가 된다. 정상적인 부하 변동에는 보통의 속도제어 기능만으로 충분하지만, 큰 부하 탈락 시에는 과속을 효과적으로 제어하기 어렵다. 본 논문에서는 발전기 부하 탈락 시의 에너지 불 평형과 속도 상승, 그리고 과속을 예측하여 미리 터빈 증기를 차단하는 제어방식에 대하여 개략적으로 기술하였다. 각 터빈-발전기는 고유의 특성과 부하가 탈락의 양상에 따라 나타나는 과도현상이 각각 다를 수 있다. 그러나 반복되는 특성을 찾는다면 보다 효과적인 대응이 가능하다고겠다. 향후 좀 더 세부적인 분야에 공부를 계속하고자 한다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Electric Machinery and Transformers, 3rd Edition, BHAG S. GURE & HUSEYIN R. HIZIROZLU,, 2001, by Oxford University Press, Inc.