

## 수력발전기 자동동기투입 실패에 관한 고찰

전규남, 장운성, 이재훈, 정재원, 안주훈  
한국수자원공사

### A Study on Auto synchronization failure of a Generator

Kyu-Nam Jeon, Moon-Soung Chang, Jae-Hoon Lee, Jae-Won Jeong, Ju-Hoon Ahn  
Korea Water Resources Corporation

**Abstract** Auto-synchronizer is important device to match the voltage, frequency, phase of the generating system to those factors of the transmission line, when the synchronous generator is operated. There were few or no incidents by Synchronization failure at Hapcheon hydraulic power plant, since it was built in 1989. but incidents by Synchronization failure have often happend lately. From now, let's improve the efficiency on the maintenance of generating equipment by studying about the cause and the method for this problem by comparing with the set point of each device of synchronizing system.

#### 1. 서 론

수력발전소는 자동전압조정장치와 조속기에 의해 발전전압에 대한 크기, 주파수 및 위상이 조정된다. 동기투입시 발전전압을 계통의 전압과 주파수, 위상에 맞춰줌으로써 계통의 안정은 물론, 설비의 충격을 막기 위해서는 동기투입장치의 역할이 무엇보다 중요하다. 합천수력 자동동기투입장치는 1대의 동기투입장치를 두 대의 발전기가 공용하고 있는 바 동기투입장치의 고장은 발전소의 전면 발전중단을 초래할 가능성이 있어 그 중요도를 무시할 수 없다. 그러나 최근 동기투입장치의 투입실패가 빈번히 발생하여 발전운영 및 전력공급신뢰도에 차질을 빚어 왔다.

따라서 본 연구에서는 동기투입의 조건을 알아보고 합천수력발전소의 전압, 주파수, 전진시간을 비교검토하기 위한 동특성시험자료를 통해 동기투입실패의 원인을 분석하고자 한다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 동기투입장치 개요

3상 동기 발전기는 일정한 주파수를 가진 교류 전력을 발생하기 위하여 일정한 속도로 회전하는 발전기로서 전력을 생산하여 계통에 원활하게 공급하기 위해서는 발전기와 계통간의 전기적 물리적 특성이 같아야만 주회로의 차단기가 투입되어 전력을 공급할 수 있도록 되어 있다. 발전기를 계통에 투입하기 위해서는

- ▶ 기전력의 크기가 같을 것
- ▶ 기전력의 주파수와 위상이 같을 것
- ▶ 기전력의 파형이 같을 것

등의 전기적 물리적 특성이 상호 일치가 되어야 만 가능하므로 발전기 및 선로측의 물리적 특성을 검출, 비교 판별하는 장치인 자동 동기투입장치가 필요하다.

##### 2.2 동기투입(Synchronizing)의 조건

3상 동기발전기를 계통에 동기투입하기 위한 조건은 다음과 같다.

- 1) 전압의 크기가 동등하고 불평형이 아닐 것  
발전기와 계통간 병입시점에 전압 크기가 다르면, 상호 연계 순간에 전압차의 크기에 따라서 무효전력의 수수가 있게 되는데 전압의 크기가 큰 쪽이 무효전력을 주고(역률계는 Lagging쪽 지시), 전압이 낮은 쪽은 무효전력을 받게 된다(역률계는 Leading쪽 지시). 이에 따라서 두 발전기간에는 무효순환전류가 흐르며, 그 크기는 다음 식과 같이 주어진다.

$$I = \frac{(V_B - V_g)}{j(X_L + X_g)} [A] \quad (1)$$

$V_B$  : 계통전압,  $V_g$  : 발전기 전압,  $X_L$  : 변압기 및 송전선의 리액턴스,  $X_g$  : 발전기의 동기리액턴스

전압의 차가 크면 동기발전기에 급격한 전류(무효회류)가 흐르는 데, 이 때 이 전류의 제곱에 비례하는 전자력과 Joule 손실이 발생하고 기계적 손상과 발열이 발생된다. 여기서  $V_B = V_g$  일 경우에는 무효순환 전류가 흐르지 않게 된다.

##### 2) 주파수가 일치할 것

계통측의 주파수와 동등한 주파수를 발생하는 발전기의 회전수를  $N_0$ 라하고 발전기의 회전수를  $N$ , 발전기축의 관성모멘트를  $J$ 라 할 때, 계통과 발전기의 주파수가 다를 때 차단기를 투입한 경우에는 회전수(주파수)의 차에 의해 다음 식과 같은 에너지 차  $W$ 가 생긴다.

$$W = \frac{J}{2} \times (2\pi \times \frac{N}{60})^2 - \frac{J}{2} \times (2\pi \times \frac{N_0}{60})^2 [J] \quad (2)$$

즉 위의 식에서  $N < N_0$  일 경우에는 계통측에서 발전기에 전력이 유입하여 발전기는 가속하게 되고, 반대로  $N > N_0$  일 경우에는 발전기에서 방출되어 감속하므로  $N = N_0$ 가 된다. 이 가감속 에너지에 의해 발전기에 기계적 Shock가 발생한다.

##### 3) 위상이 일치할 것

계통측의 전원전압과 발전기축 전압에 위상차가 발생할 때는 다음 식과 같이 동기화 전류가 흐른다.

$$I_{SC} = \frac{2V}{X_0 + X_g + X_n} [A] \quad (3)$$

$V_0 = V_g = V$ ,  $V_0$  : 계통 전압,  $V_g$  : 동기발전기축 전압,  
 $X_0, X_g, X_n$  : 발전기 동기 임피던스 및 계통 임피던스

이 전류에 의해 계통전압의 위상이 발전기축의 전압보다 앞설 때는 아래 식 (4)의 전력이 계통측 전원에서 발전기에 유입하여 발전기를 가속시키도록 작용하고 반대로 뒤질 때는 발전기에서 방출하여 발전기를 감속시키게 작용하여 아래 식 (5)의 동기화력이 발생하여 위상각 차가 작아진다. (즉 위상각이 상이할 경우 두 전원간에는 위상차에 의한 유효전력의 수수관계가 발생하며, 앞서 설명한 무효전력과 마찬가지로 위상이 빠른 발전기축이 유효전력을 주고, 위상각이 뒤진 발전기는 유효전력을 받는다. 즉, 위상각이 낮은 발전기의 경우 계통에서 순간 전력을 받으므로 Reverse Power쪽으로 이동한다. 이 발전기가 무부하 상태에서 병입시는 Reverse Power를 받으며, Reverse power relay가 작동할 수 있다. 따라서 무부하 발전기를 병입시는 차단기 투입시점을 약간 Leading angle로 하여 시행한다. 또한, 양 발전기간(또는 발전기와 계통간) 전력 수수관계, 즉 받는 전력은 다음과 같다.

$$P = \frac{3V_0 V_g}{x_0 + x_g + x_n} \sin \delta \quad (4)$$

$$\frac{dP}{d\delta} = \frac{3V_0 V_g}{x_0 + x_g + x_n} \cos \delta \quad (5)$$

$\delta$  = 두 발전기(또는 발전기와 계통간)의 위상차

위 식에서 설명한 것과 같이 발전기 병입 순간 전압의 크기와 위상이 상이할 경우 무효 전력 및 유효전력 수수에 따른 역전력이 발생할 수 있고, 차단기 투입 순간 current가 bumping 할 수 있으며, 이 경우에 위상이 90도를 초과하면 동기화력 식(5)는 마이너스가 되고 발전기는 탈조상태가 된다. 또 위상이 180도일 때 차단기를 투입하면 3상 돌발단락전류(S.C Current)보다 큰 돌입전류가 흐르게 되

어 발전기/터빈에 치명적 손상을 줄 수 있다. 이때, Anchor point, 권선, Bearing 계통, 플라휠 계통(DG의 경우), Blade Stern(터빈의 경우)등 금속 내외부에 충격이 있을 가능성이 높아 수명이 단축되고 최악의 경우 권선소손사고를 일으키고, 돌입전류에 의한 전압변동도 발생한다. 이를 대비하여 계통측과 발전기측의 차단기 양측 사이의 전압과 주파수를 동등하게 하고 동기 검정기에 의해 위상차를 검출하여 Governor에 가감속을 위한 Pulse를 주어 동기속도에 일치시켜 투입한다.

### 2.3 합천수력 동기투입장치.

합천수력의 동기 투입장치는 다음과 같이 3가지의 Device를 가지고 있으며 다음과 같은 사양으로 구성되어 있다.

〈표 1〉 동기투입장치 사양

구분	Automatic Speed Regulating device(#15)	Automatic Voltage Balance Regulator(#60)	Synchronizer(#25)
별칭	SOFBC		SBR4FC
일련	<ul style="list-style-type: none"> <li>발전기측 정격전압 : 110V 또는 110/√3V</li> <li>계통측 정격전압 : 110V 또는 110/√3V</li> <li>허용전압 변동범위 : 양측 모두 정격전압의 ±50%에서 -70% 이내</li> <li>허용최대 주파수 : 약 10Hz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>발전기측 정격전압 : 110V 또는 110/√3V</li> <li>계통측 정격전압 : 110V 또는 110/√3V</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>발전기측 정격전압 : 110V 또는 110/√3V</li> <li>계통측 정격전압 : 110V 또는 110/√3V</li> <li>허용전압 변동범위의 발전기측 정격전압의 ±20% 이내</li> <li>계통측 정격전압의 ±10% 이내</li> <li>검출가능주파수 : 0.05Hz 이상</li> </ul>
별칭	<ul style="list-style-type: none"> <li>연속 제어범위의 주파수차 Δf : 1~6Hz, 연속조정가능 (τ 대략 110~670 msec)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Small Dead Zone : 1.5~3% 연속조정가능</li> <li>Large Dead Zone : 2~9% 연속조정가능 (100%~110V)</li> <li>제어시간 : 0.1~1.0초</li> <li>Small Dead Zone Dead Time : 0.5~5초</li> <li>Large Dead Zone Dead Time : 1~10초</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>투입지시준비시간(ΔT) : 0.1~0.5초 사이에서 규정값으로 제작</li> <li>투입가능주파수차(Δf) : 0.15~0.25Hz에서 연속 조정가능</li> <li>신압평형정확(ΔV) : 2~5V(연속 조정가능)</li> </ul>
출력	<ul style="list-style-type: none"> <li>Range or Lower 보조필터 (Type HF23, DC24V)</li> <li>전류 : AC/DC 6A</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Up or Down 보조필터 (Type HF23, DC24V)</li> <li>전류 : AC/DC 6A</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Closing 지시용 보조필터 (Type HF23, DC24V)</li> <li>전류 : AC/DC 6A</li> <li>Closing 명령지시시간 : 1sec</li> </ul>
제전압	<ul style="list-style-type: none"> <li>정격전압 : ±24V</li> <li>허용전압변수범위 : ±30% 이내</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>정격전압 : ±24V</li> <li>허용전압변수범위 : ±30% 이내</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>정격전압 : ±24V</li> <li>허용전압변수범위 : ±30% 이내</li> </ul>
주온도	-10℃ ~ +60℃	-10℃ ~ +60℃	-10℃ ~ +60℃
소비VA	<ul style="list-style-type: none"> <li>AC입력 : 약 0.4VA</li> <li>발전기측 : 약 0.4VA</li> <li>제어전원 : 약 20VA</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>AC입력 : 약 0.4VA</li> <li>발전기측 : 약 0.4VA</li> <li>제어전원 : 약 20VA</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>계통측 또는 발전기측 : 약 5VA(정상의 정격전압에서)</li> <li>제어전원 : 약 20VA</li> </ul>

### 2.4 동기투입 실패현황

동기투입 실패현상은 비 주기적이고 발전호기에 관계없이 발생하였으며 HOC(발전통합시스템 원격운전) 및 Desk(수동모드)에 관계없이 현상이 발생하는 것을 표2에 나타내었다.

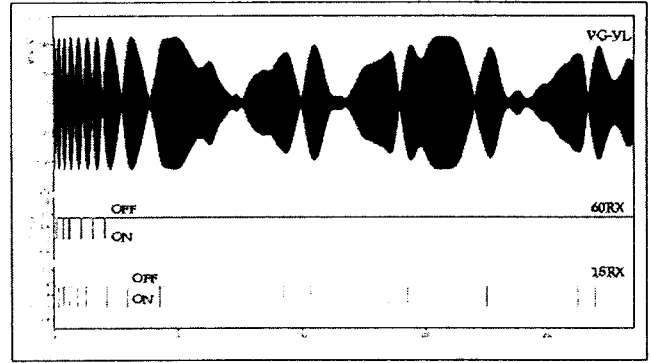
〈표 2〉 동기투입실패현황

일자	호기	동작시간(sec)		전압(kV)		무효전력	투입여부	기타	
		동기투입명령 ON	48STT 투입	투입	재가동				Line
6. 13	No.2	9:55:46	10:03:29			159.34	12.58	X	SCADA
				10:09:09		159.36	12.58	○	DESK
				10:18:00		161.79	13.35	10.63	○
6. 30	No.2	9:57:44	10:05:31			160.93	12.70	X	SCADA
				10:17:02		160.49	12.67	○	DESK
				10:25:00		161.23	13.31	9.99	○
7. 01	No.1	10:59:00	11:09:49			159.05	12.47	X	SCADA
				11:26:12		159.39	12.55	○	DESK
				11:38:00		160.47	13.31	9.80	○
7. 04	No.1	19:55:48	20:03:49			158.17	12.46	X	SCADA
				20:20:57		159.51	12.64	○	DESK
				20:30:00		161.00	13.33	9.72	○
7. 07	No.2	10:05:25	10:13:16			160.69	12.65	X	DESK
				10:24:25		160.65	12.69	○	DESK
				10:32:00		162.12	13.40	9.81	○
7. 11	No.2	13:03:38	13:11:27			161.56	12.76	X	SCADA
				13:22:47		161.28	12.75	○	DESK
				13:32:00		161.94	13.43	10.77	○

#### 2.4.1 동기투입 실패시의 파형 분석

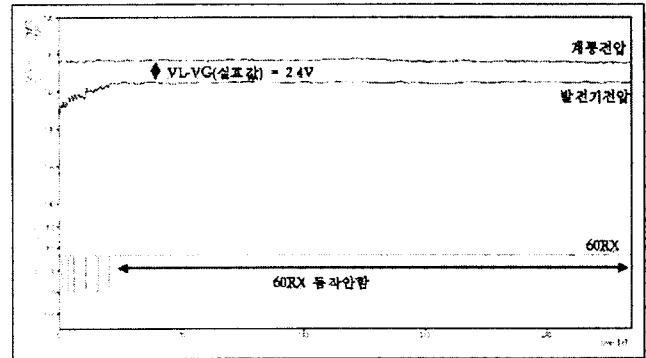
아래그림은 동기투입 실패시의 파형을 측정 한 것으로 이 때 동기 투입장치의 출력신호(60RX, 15RX)를 분석하여 보면 자동속도조정장치(15)는 위상의 변화에 따라 정상적으로 동작하는 것을 알 수 있으나, 자동전압평형장치(60)의 경우 일정 시간 후 60RX의 출력신호

가 발생하지 않는 것을 알 수 있으며



〈그림 1〉 동기투입실패시 파형1-1

이때 발전기 전압(VG)과 계통전압(VL)의 전압차는 2.4V의 정도 발생하는 것을 알 수 있다.

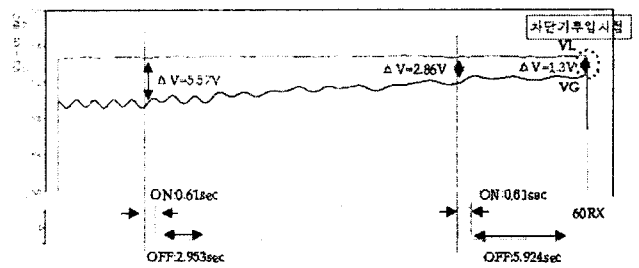


〈그림 2〉 동기투입실패시 파형1-2

따라서 전압편차(2.4V)가 자동동기화장치(25)의 전압편차 설정치(ΔV=2V) 이내로 될 때까지 자동전압평형장치(60)에서 6초마다 0.6초간 전압상승 신호를 발생시켜야 하나 그렇지 못하므로 동기투입이 되지 않는 것이다.

#### 2.4.2 자동전압평형장치(60) 교체후 동작 상태 분석

발전기 전압과 계통전압과의 전압편차(ΔV)에 따라 자동전압평형장치에서 설정치에 적합하게 전압상승 신호를 송출하는 것을 볼 수 있다



〈그림 3〉 자동전압평형장치동작 파형

### 3. 결 론

발전기를 계통에 투입하기 위해서는 병인 시점에서의 발전기와 계통의 전압의 크기가 동등하고 주파수와 위상이 일치하여야 하는데, 동기투입장치는 이러한 발전기 및 계통의 물리적 특성을 검출, 비교 판별하는 능력을 모두 갖추어야 한다. 합천수력 동기투입장치에 대한 수회에 걸친 동특성 시험 결과 전압편차(2.4V)가 자동동기화장치(25)의 전압편차 설정치(ΔV=2V) 이내로 될 때까지 자동전압평형장치(60)에서 6초마다 0.6초간 전압상승 신호를 발생시켜야 하나, 그렇지 못하여 동기투입이 되지 않았다. 자동전압평형장치를 교체함으로써 발전기 전압과 계통전압과의 전압편차(ΔV)에 따라 자동전압평형장치에서 설정치에 적합하게 전압상승 신호를 송출하고 전진시간이 차단기 동작시간과 일치하는 것을 볼 때 계통과 발전기간의 위상차가 존재하지 않음으로써 동기투입이 정상적으로 이루어지고 있다.