

컨버터가 내장된 교류발전기 병렬운전중의 헌팅을 균압선을 이용해 제거하는 방법에 관한 연구

김광만* · 노창주** · 오진석** · 안병원***

A Study on the Removing Method of Hunting by Equalizing Line during Parallel Running of alternator Equipped with converter

K.M.Kim · C.J.Noh · J.S.Oh · B.W.An

Key words : Hunting(난조), Synchronizing Current(동기 화전류), Synchronizing Power(동기 화력)

Abstract

This paper is a research for removing the alternators hunting which came about during the parallel running. The four-pole six-phase alternator is equipped with the converter made out of twelve diodes to rectify all the waves.

The hunting came about during the battery charging due to the hunting inducing point existed in r.p.m band 1575[rpm]~1690[rpm]). To remove the hunting inducing point, We modified the four-pole six-phase alternator into the four-pole twelve-phase and increased the short-circuit ratio by decreasing the field coil pitch and increasing the field coil turns. But this method has two defects, the first, the alternator structure becomes complicating and the second, the alternator equipped with the converter used in general purpose lately, such as the car alternator, can not be run in parallel without modifying.

To remove the defects, the equalizing line was connected between the same phase of the alternator to flow the synchronizing current which synchronize the phases of generator electromotive forces, by which the alternator can be run in parallel without reference to the hunting inducing point and without modifying.

* 한국해양대학교 대학원(원고접수일 : 99년 2월)

** 한국해양대학교 교수

*** 목포해양대학교 교수

1. 서 론

본 논문은 모 축전지 공장의 발전기를 병렬운전 할 때에 생기는 헌팅을 균압선을 이용하여 제거한 연구 결과이다. 연구 대상인 4극 6상 교류발전기는 교류를 전파정류 하기 위해서 다이오드 12개로 구성된 컨버터를 내장하고 있다. 헌팅 원인을 규명해 본 결과 축전지를 충전할 때에 회전수 범위 1575[rpm]~1690[rpm]에서 생기는 헌팅유발점에 의해 헌팅이 일어난다는 사실을 알게 되었다. 헌팅의 원인인 헌팅유발점을 제거하기 위해 교류발전기를 4극6상에서 4극12상으로 개조하여 리플 전압을 줄이고 또한 계자의 권전수를 증가시킴과 동시에 코일피치를 줄여 단락비를 높인 결과 헌팅은 제거되었으나 이런 방법으로는 발전기의 구조가 복잡해지고 개조 비용이 많이 드는 결점이 있고 또한 최근에 자동차용 전원 등 여러 곳에서 직류전원으로 많이 사용되고 있는 컨버터가 내장된 범용의 교류발전기를 필요시 바로 병렬운전할수 없는 결점이 있다. 본연구는 이런 결점을 없애기 위해서 컨버터의 다이오드를 통과하기 전의 한 지점에서 두 발전기의 같은 상을 각각 균압선으로 연결하여 두 발전기 기전력의 위상을 일치시키는 역할을 하는 동기화전류가 흐르도록 해서 헌팅유발점에서 발생한 헌팅이 즉시 소멸되게 했다. 이와 같이 본래의 교류발전기를 개조하지 않고도 균압선을 이용한 간단한 방법으로 부하의 종류와 회전수 범위에 관계없이 헌팅이 발생하지 않는 발전 시스템을 만들 수 있었다.

2. 이론해석

동기발전기의 병렬운전중에 헌팅유발점에서 돌발적인 부하 변동이 생기면 두 발전기의 각속도에 차이가 생기게 되므로 두 발전기 유도기전력간에 위상차가 생기게 된다". 그러나 두 발전기 기전력의 위상차에 의한 전류를 두 발전기 사이로 순환시키면 아래와 같은 이유로 가버너의 정속도 유지력과 협력하여 두 발전기의 각속도를 일치시키는 작용을 하게 되는데 이와 같이 두 발전기 위상차에 의해 두 발전기 사이를 흐르는 전류를 동기화전류

라고 하고 동기화전류에 의해 생겨 두 발전기를 동기화 시키는 작용을 하는 전력을 동기화력이라고 한다¹⁾²⁾³⁾.

2. 1 동기화전류

병렬운전중에 돌발적인 부하 변동으로 인해 G₁ 발전기 기전력 E₁의 위상이 G₂ 발전기의 기전력 E₂의 위상보다 θ (rad)만큼 앞섰다고 가정했을 때 Fig. 1과 같이 기전력 E₁과 E₂의 전위차인 E_s에 의해 식 (1)로 표시되는 유효회류 또는 동기화전류라고 하는 I_s가 두 발전기 사이를 순환하게 된다면 Fig. 1에 서 I_s, E_s와 -E₂ 간에는 아래와 같은 관계가 있다는 것을 알 수 있다.

- ① I_s가 E_s보다 대략 90° 지상이다.
- ② I_s와 E₁간에는 대략 θ_2 의 위상차가 있다.
- ③ I_s와 -E₂간에는 대략 $\pi - \frac{\theta}{2}$ 의 위상차가 있다.

따라서 E₁=E₂=E이고 E_s는 E₁과 E₂의 전위차, Z_s는 발전기 1대당의 동기 임피던스라고 하면

$$I_s = \frac{E_s}{2Z_s} = \frac{2E \sin \frac{\theta}{2}}{2Z_s} = \frac{E}{Z_s} \sin \frac{\theta}{2} \quad (1)$$

가 된다. 그런데 I_s에 의해 생기는 전력은 각각의 발전기에 아래와 같은 영향을 주게 된다.

- ① G₁ 발전기에 영향을 주는 전력

$$P_1 = E_1 I_s \cos \frac{\theta}{2} = E \frac{E}{Z_s} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} = \frac{E^2}{2Z_s} \sin \theta \quad (2)$$

- ② G₂ 발전기에 영향을 주는 전력

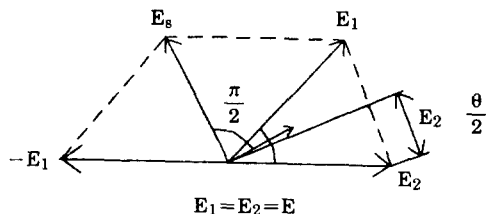


Fig. 1 Vector diagram when E₁ is leading

$$P_2 = E_2 I_S \cos(\pi - \frac{\theta}{2}) = -\frac{E^2}{2Z_s} \sin \theta$$

$$= -P_1 [W/Ph] \tag{3}$$

G₁ 발전기에 작용하는 전력은 +이므로 G₁ 발전기는 P₁ 전력을 G₂ 발전기에 공급하게 되므로 부하가 증가되어 각속도가 감소하고 G₂ 발전기에 작용하는 전력은 -이므로 G₂ 발전기는 G₁ 발전기로부터 전력 P₁을 받아들여 그 전력 분 만큼 전동기화 되어 부하가 감소하게 되므로 각속도가 증가되어 다시 E₂의 위상이 앞서게 되는데 이러한 동작이 계속되므로 일정한 시간이 흐르면 두 발전기의 위상은 자동적으로 일치하게 되어 두 발전기가 동기화 된다. 다시말하면 동기화전류는 가버너의 정속도 유지력과 협력하여 두 발전기 원동기의 각속도를 일치시키는 역할을 한다.

2.2 동기화력

동기화전류의 흐름에 의해서 발생하는 위상평형 작용의 강도는 위상각θ와 P₁, P₂ 전력에 의해 결정되는 동기화력 P_S 의해 정해지는데 P=P₁=-P₂이므로 식 (4)와 같이 표시할 수 있다.

$$P_S = \frac{dP}{d\theta} = \frac{d}{d\theta} (-\frac{E^2}{2Z_s} \sin \theta)$$

$$= \frac{E^2}{2Z_s} \cos \theta \tag{4}$$

식 (4)에서 동기화력은 θ=0일 때에 최대, θ=π/2일 때에 0이 되고 θ>π/2일 때에는 -로 되어 두 발전기의 위상차가 더 커지게 되므로 동기 이탈이 일어나 병렬운전이 불가능 하게 된다.

3. 헌팅의 원인 추정

연구 대상인 발전기를 단독 또는 병렬운전할 때에 부하가 순수한 저항이면 헌팅이 일어나지 않았으나 용량성 부하인 축전지를 충전할 때에는 특정한 회전수범위에서 헌팅이 발생했었다. 그러나 단독운전시의 헌팅은 돌발적인 부하 변동이 생겼을 때에 생기는 일시적인 감속진동으로 시간이 경과함에 따라 안정상태인 설정속도로 되어 정상운전이 가능했으나 병렬운전시의 헌팅은 계속되어 병

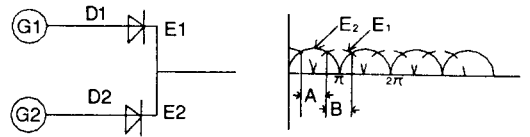


Fig. 2 Waveform when E₁ is leading

렬운전이 불가능했다. 헌팅이 생기는 원인을 찾기 위해 1, 2호 발전기를 단독운전하면서 회전수, 여자전류, 부하전류 및 컨버터 출력전압의 변동에 따른 헌팅 여부를 조사를 한 결과 축전지전압이 어느 수준까지 오른 후에 일정해지면서 전류는 급격히 감소하는 정전압충전⁴⁾ 구간(rpm이 1575~1690 범위)에서 헌팅이 일어났으나, 단독운전시에는 그 헌팅이 단시간에 소멸되어서 설정속도로 안정되는 것으로 보아 두 발전기 가버너의 감도는 적당하고 그 밖의 헌팅의 지속 요인도 없다는 것을 알수 있고 병렬운전시에도 정전압충전 구간에서만 헌팅이 일어나는 것으로 보아 두 발전기의 전압조정기 및 전압변동률에는 문제가 없고 각속도 변화율에 차이가 생기게 되는 점 즉 헌팅유발점의 존재가 헌팅의 원인이라는 것을 알게 되었다. 또한 연구대상인 발전기 병렬운전 회로 Fig. 2에서 일반 교류발전기를 병렬할 때와의 차이점을 비교해보면 아래와 같은 두 가지 사실을 알 수 있다.

- ① 두 기전력 E₂ 와 E₁의 크기가 다를 때에 다이오드 D₁, D₂로 인해 두 발전기 사이로 동기화전류가 흐르지 못하므로 연구 대상인 두 발전기 사이에 동기화 전류를 흐를 수 있도록 하기 위해서는 균압선을 설치해야 한다.
- ② E₂>E₁일 경우에 다이오드의 작용으로 인해 G₁ 발전기에서는 전류가 흘러나오지 못하게 되어 기전력이 큰 G₂ 발전기가 전부하를 담당하게 되므로 연구대상 발전기에는 두 유도기전력의 크기를 일치시킬 수 있도록 정밀한 전압조정기를 설치했다. 그러나 돌발적으로 큰 부하 변화가 생기는 헌팅유발점에서는 두 교류발전기의 각속도 크기에 차이가 생길 수 밖에 없는데, 변화된 E₁의 위상이 E₂보다 π/2 만큼 앞섰다고 가정하면 A구간에서의 두 발전기 기전력의 순시값 이 E₂>E₁이므로 G₂가 전부하를 담당하게 되어 G₁은 무부하 상태가 되고 B구

Table 1 Causes and removing methods of hunting

	교류발전기		컨버터가 내장된 교류발전기	
	단독운전	병렬운전	단독운전	병렬운전
원인	헌팅유발점의 존재	1. 헌팅유발점의 존재 2. 두 발전기 기전력의 위상차가 $\pi/2$ 이상일때	헌팅유발점의 존재	1. 헌팅유발점의 존재 2. 두 발전기 기전력에 위상차가 생겼을 때
헌팅 제거 방법	헌팅유발점의 제거	헌팅유발점을 제거하거나 두 발전기 기전력의 위상차를 $\pi/2$ 이하로 유지시킨다.	헌팅유발점의 제거	헌팅유발점을 제거하거나 두 발전기 기전력의 위상을 일치시킨다.
기타	헌팅유발점이 존재해도 일정한 시간이 지나면 자동적으로 헌팅이 제거된다.	가버너의 정속도 유지력과 동기화력에 의해 두 발전기 기전력의 위상은 자동적으로 일치된다.	헌팅유발점이 존재해도 일정한 시간이 지나면 자동적으로 헌팅이 제거된다.	동기화전류를 인위적으로 흘려야만 동기화력과 가버너의 정속도 유지력에 의해 두 발전기 기전력의 위상이 일치된다.

간에서는 그 반대가 되므로 부하는 교대로 두 발전기를 이동하게 되어 발전기는 헌팅하게 된다. 그림에서는 위상차가 $\pi/2$ 일 때를 예로 들었지만 위상이 조금이라도 다르면 헌팅이 일어날 수밖에 없다.

위의 내용에서 알 수 있듯이 연구 대상 발전기를 병렬운전 할 때에는 동기화 전류가 흐를 수 없으므로 돌발적인 부하 변동 요인이 되는 축전지를 부하로 했을 때에는 원동기 가버너의 정속도 유지력만으로는 헌팅을 억제할 수 없지만 돌발적인 부하 변동이 없는 순수한 저항부하인 경우에는 가버너의 정속도 유지력만으로 헌팅을 억제할 수 있었기 때문에 헌팅이 일어나지 않았음을 알 수 있다. 따라서

- ① 디젤기관의 낭비시간으로 인해 제어계가 정귀환화 하는 현상이 일어나지 않고
- ② 두 발전기 가버너의 감도가 적당하고
- ③ 두 발전기의 전압조정기의 특성이 같고
- ④ 두 발전기 전압변동률이 같고
- ⑤ 그 밖의 기계적인 헌팅 요인이 없을 때에

두 발전기 각속도 변화율에 약간의 차이가 있어 일어나는 헌팅 원인과 제거방법은 Table 1과 같이 정리할 수가 있다.

4. 실험 및 고찰

동기화전류는 두 발전기 기전력의 위상을 일치

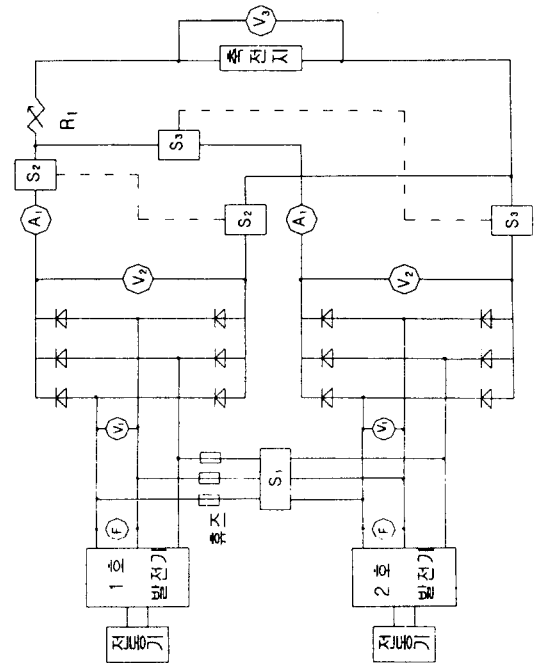


Fig. 3 Experiment circuit

시키는 역할을 하므로 헌팅유발점에서 생긴 두 발전기 기전력의 위상차를 다시 일치시키는 역할을 할 수 있을 것으로 추정하고 컨버터의 다이오드를 통과하기 전의 한 지점에서 두 발전기의 같은 상을 균압선으로 연결하여 두 발전기 사이로 동기화전류를 순환하도록 한 결과 동기화력과 가버너의 정속도 유지력이 합력하여 헌팅을 제거하는 것을 확인하였다.

4. 1 실험장치의 구성

Fig. 3은 실험회로도이며 회로의 구성 기기와 계측기 및 계기 목록은 각각 Table 2와 3과 같다.

4. 2 실험장치의 개요

실험장치중에서 핵심이 되는 장치는 아래와 같다.

4. 2. 1 발전기 구동용 원동기

병렬운전시에 두 발전기의 유도기전력의 크기에 차이가 생기면 전압조정기와 두 유도기전력의 크기의 차에 의해 두 발전기 사이를 흐르게 되는 무효회류가 합력하여 두 유도기전력의 크기를 같게 하고 두 유도기전력에 위상차가 생기면 원동기 가버너의 정속도 유지력과 동기화력이 합력하여

두 기전력의 위상을 일치시킨다¹⁾. 그런데 앞에서 언급한 대로 연구 대상인 두 발전기의 전압조정기는 정밀한 것이므로 병렬중인 두 발전기의 유도기전력의 크기는 항상 같았고 전압변동률도 같았다. 따라서 두 발전기 유도기전력의 크기가 달라서 생기는 무효회류의 영향은 고려하지 않아도 되고 단지 헌팅유발점에서 각속도의 변화로 생기는 두 기전력의 위상차가 문제이므로 실험장치의 발전기 구동용 원동기는 두 유도기전력을 일정하게 유지시키기 위해서 정속도특성을 가진 영구자석계자를 이용한 직류분권전동기²⁾를 사용했다.

4. 2. 2 교류발전기

본논문의 목적이 컨버터가 내장된 범용의 교류

Table 2 구성 기기 목록

Item	Description	Q' ty	Remark
Motor	Maker : HITACH, LTD DCM-05A02E432 Rated rpm : 3700 Rated Current : 2.2[A] Voltage for rpm control : 0 30[V]	2 Set	Shunt motor with permanent magnet field
Alternator	Maker : DAWOO AUTOMOTIVE CO.,LTD. 31400A78B02 Rated Voltage : 12[V] Rated Current : 50[A]	2 Set	
Converter	3 Phase All Wave Bridge	2 Set	
Lead-acid Battery	Voltage : 2[V]×3=6[V] 10 Hour Discharge Rate : 4[A/h]	1 Set	
DC Power Supply	Voltage Range : 0 30[V] Ampere Range : 0 5[A]	2 Set	For motor driving and alternator exciting current supply
Variable Resistor	For control charging current	1 Set	R1

Table 3 계측기 및 계기 목록

Item	Description	Q' ty	Remark
Oscilloscope		1 Set	
Voltmeter	V ₁ : For alternator(AC) V ₂ : For converter(DC) V ₃ : For battery(DC)	2 Set 2 Set 1 Set	Range : 0[V]~10[V]
Ammeter	① A1 : For converter current(DC) ② For synchronizing current(AC)	1 Set 1 Set	0~10[A] 0~3[A]
Frequency Meter (Digital)	For alternator frequency	2 Set	F
Switch	S ₁ : Equalizing Line S ₂ : Alternator ACB S ₃ : Alternator ACB	1 Set 1 Set 1 Set	No.1 Alternator No.2 Alternator
Fuse	For equalizing line	3 Set	Rated Current : 2[A]

발전기를 구조변경 없이 바로 균압선을 설치해서 헌팅이 없는 상태로 병렬운전하는 것이므로 일반적으로 많이 사용되며 구조도 간단한 2극 3상 교류발전기를 실험 용으로 채택했다.

4.2.3 균압선

두 발전기 사이로 동기화전류를 흐르게 하기 위해 컨버터 입구의 한 지점에서 두 교류발전기의 같은 상을 각각 균압선으로 연결했다.

4.2.4 디지털 주파수계

연구 대상 발전기는 교류발전기의 주파수를 변화시켜 유도기전력의 크기를 변화시키므로 낮은 주파수도 검출할 수 있는 디지털 주파수계를 이용했다.

4.3 실험 및 고찰

4.3.1 리플전압

Fig. 4는 직류전압이 5.5[V]일 때의 리플전압과 형인데 리플전압은 1.44[V]이다.

4.3.2 위상 변화

축전지를 부하로 하고 교류전압을 변화시켜 가면서 두 발전기 기전력에 위상차가 생기도록 조절한 후에 동기화 전류를 흘려본 결과 전 전압영역에서 두 기전력의 위상이 일치되는 것을 확인했다.

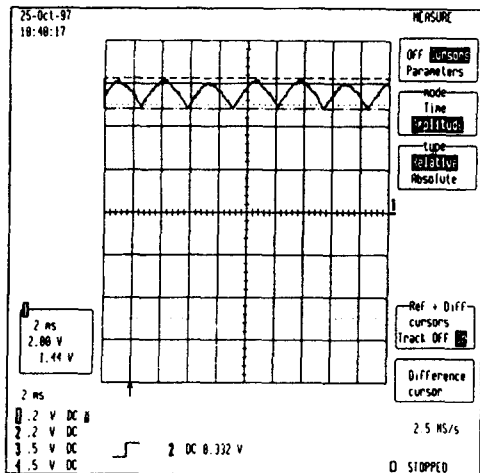
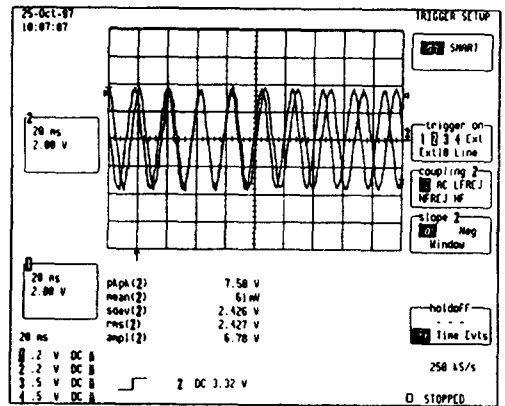


Fig. 4 Ripple voltage at DC 5.5[V]

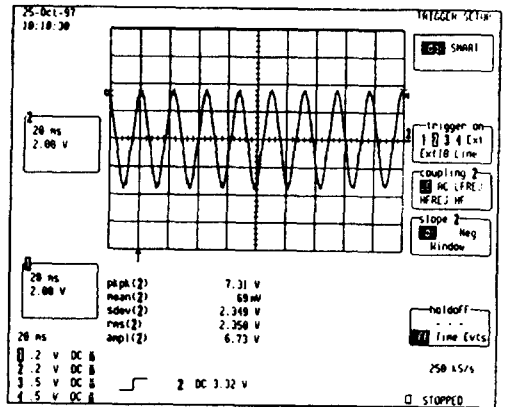
Fig. 5 Fig. 8은 선간전압이 각각 4.0[V], 4.5[V], 5.0[V], 5.5[V]에서 두 발전기의 유도기전력에 위상차가 있는 상태에서 동기화 전류를 흘렸을 때에 같은 상의 두 기전력 위상이 일치된 것을 보이고 있다.

4.3.3 동기화전류

주파수가 26.7[Hz] 및 28[Hz]일 때의 동기화전류의 크기를 조사하여 Table 5에 표시했다. 동기화전류가 부하전류에 비해서 큰 편인 것은 실험용 발전기가 소형이므로 임피던스가 작고 시험 주파수도 낮기 때문이다. 또한 가버너의 성능이 좋을수록 동기화전류는 줄어든다.

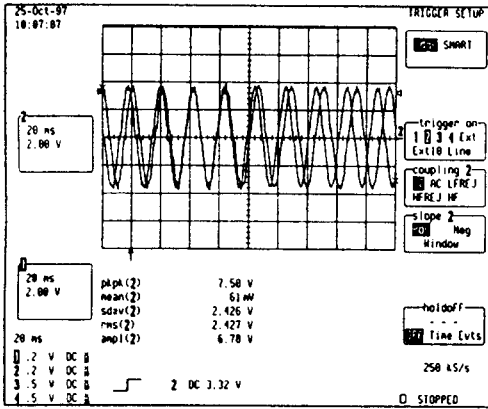


(a) Different phase condition

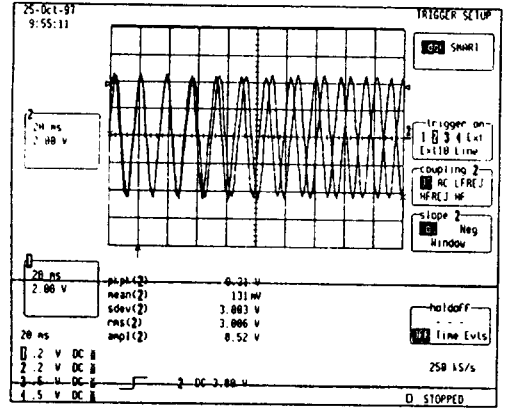


(b) Synchronous condition

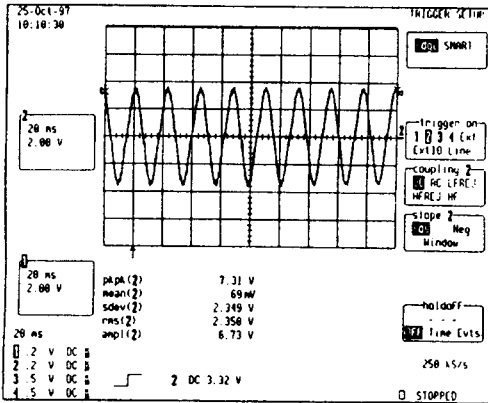
Fig. 5 Wave form at AC 4.0[V]



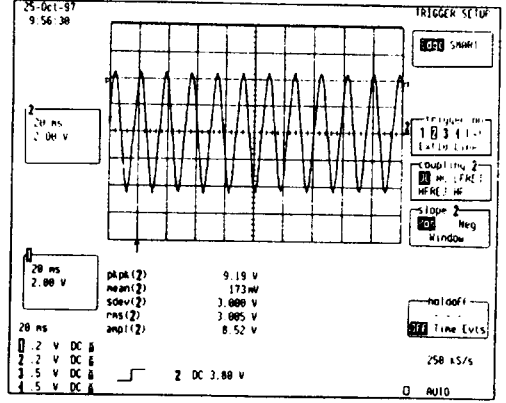
(a) Different phase condition



(a) Different phase condition



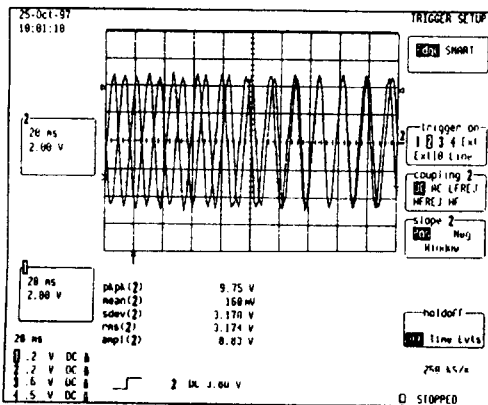
(b) Synchronous condition



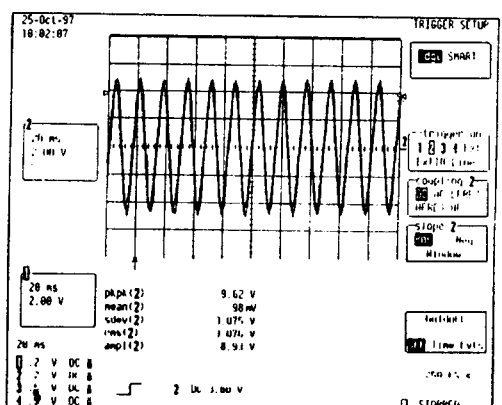
(b) Synchronous condition

Fig. 6 Wave form at AC 4.5[V]

Fig. 7 Wave form at AC 5.0[V]



(a) Different phase condition



(b) Synchronous condition

Fig. 8 Wave form at AC 5.5[V]

Table 4 Synchronizing current

기전력주파수	직류출력전압[V]	축전지전압[V]	두 발전기의 부하전류[A]		동기화 전류[A]
			균압선차단(헌팅상태)	균압선 연결	
26.7	6.3	6.0	1번 : 0.0~0.5	1번 : 0.1	0.86~0.90
			2번 : 0.0~0.5	2번 : 0.1	
28.0	6.5	6.1	1번 : 0.0~0.8	1번 : 0.12	0.74~0.78
			2번 : 0.0~0.8	2번 : 0.12	

5. 결 론

참고문헌

본 실험에서 아래와 같은 사실을 알 수 있었다.

- ① 컨버터가 내장된 교류발전기에 균압선을 설치하여 헌팅을 제거하면 교류발전기의 복잡한 개조작업과 개조비용이 필요하지 않고, 발전기의 호환성이 있을 뿐만 아니라 발전기 시스템이 차지하는 기관실 공간점유율도 커지지 않으므로 편리하다.
- ② 교류발전기를 병렬운전할 때에는 두 발전기가 버스(Bus)를 공유⁶⁾하므로 동기화전류가 두 발전기 사이를 흐를 수 있어 헌팅유발점에서 두 유도기전력에 위상차가 생겨도 원동기 가버너의 정속도 유지력과 동기화력이 합력하여 위상을 일치시켜 헌팅을 억제할 수 있다. 컨버터가 내장된 교류발전기에서는 컨버터의 다이오드 작용때문에 동기화전류가 흐를 수가 없어 기전력의 위상을 일치시키는 역할은 가버너의 정속도 유지력 뿐이므로 돌발적인 부하 변동이 생기면 헌팅이 일어난다.
- ③ 직류발전기는 두 발전기의 단자전압만 같으면 병렬운전이 가능하지만 컨버터가 내장된 교류발전기는 저항부하일 경우는 직류 단자전압만 같으면 병렬운전이 가능하지만 용량부하일 경우에는 교류전압의 위상도 같아야 병렬운전이 가능하다.

- 1) 森田豊 ; “船用電機の取扱と修理”, pp. 65~72
- 2) 盧彰注 ; “舶用電氣”, pp. 248~252
- 3) 李成馥 ; “電氣工學”, pp. 286~291
- 4) 小美川眞止 ; “直流電氣讀本” pp. 33~34
- 5) 中村 修照 외 1人 ; “モタ活用マニュアル”, pp. 66
- 6) TERASAKI ELECTRIC CO., LTD ; “MAIN SWITCHBOARD”, pp. 2-10, 2-23