

컨버터가 내장된 교류발전기 병렬운전중의 현팅 억제에 관한 연구

김광만* · 노창주** · 오진석** · 안병원***

A Study on the Controlling Method of Hunting Inducing Point during Parallel Running of alternator Equipped with converter

K.M.Kim · C.J.Noh · J.S.Oh · B.W.An

Key words : Altrnator Equipped with Converter(정류기가 내장된 교류발전기), Hunting(난조), Hunting Inducing Point(현팅 유발점)

Abstract

This paper is a research for removing the hunting which came about during the parallel running of the alternators which, four-pole six-phase, have the converter with twelve diodes to rectify all the waves. During the parallel running, the hunting came about under the period of 0.2~0.3[sec], not when it's load was the resistance, but the capacity at the rpm band 1575[rpm] 1690[rpm]. This hunting, in our judgement, was not come about from the general hunting causes which have been already known to, but the special example. And so we checked that the hunting came about or not as per the changes of the rpm, exciting current, load current and converter output voltage and the following facts were revealed.

- . The hunting occured during the constant voltage charging where r.p.m band is from 1575[rpm] to 1690[rpm].
- . The hunting did not came about during the constant power charging in which there was the large difference between the converter output voltage and the battery voltage.
- . The hunting did not came about in the low rpm band.

We could see, from the above facts, that the existence of the hunting inducing point at the constant voltage charging band was the direct cause of the hunting. After trying every possible means to remove the hunting inducing point, we could know that the modification of the synchronous generator is suitable for the purpose in view of the small engine room.

* 한국해양대학교 대학원(원고접수일 : 99년 2월)

** 한국해양대학교 교수

*** 목포해양대학교 교수

1. 서 론

본 논문에서는 발전기의 병렬운전중에 발생하는 현팅의 원인을 규명하고 이를 억제한 연구를 기술하고 있다. 연구 대상인 4극 6상 교류발전기에서 나온 교류는 다이오드 12개로 구성된 컨버터에 의해서 전파정류 되어 부하에 공급된다. 발전기를 단독운전할 때에는 현팅이 일어나지 않았지만 병렬운전시 부하가 축전지이고 회전수가 1575[rpm] 1690[rpm] 범위에서는 두 발전기가 1/2씩 부하를 분담하지 못하고 0.3~0.2[초]의 주기로 부하가 두 발전기 사이를 이동하는 현팅 현상이 일어났다. 이 현팅은 일반적으로 이미 알려져 있는 현팅 원인에 의한 것이 아닌 특수한 경우인 것으로 판단되어 그 원인을 규명하기 위해 1, 2호 발전기를 단독으로 운전하면서 회전수, 여자전류, 부하전류 및 컨버터 출력전압의 변동에 따른 현팅여부를 조사, 분석한 결과 아래와 같은 사실을 알게 되었다.

- 축전지전압이 어느 수준까지 오른 후에 일정해 지면서 충전전류는 급격히 감소하는 정전압충전 구간(회전수 범위 : 1575[rpm]~1690 [rpm])에서 현팅이 일어난다.
- 컨버터 출력전압과 축전지전압의 차가 큰 정전력충전 구간에서는 현팅이 일어나지 않는다.
- 회전수가 낮은 구간에서는 현팅이 일어나지 않는다.

위의 결과에서 정전압충전구간에서 발전기 원동기의 각속도 변화 원인이 되는 부하 변동이 일어나는 점 즉 현팅유발점이 생긴다는 것을 알 수 있었다. 현팅유발점의 존재가 현팅의 원인이 되므로 현팅유발점을 제거하기 위해 여러 가지 방법들을 시스템에 적용해 본 결과 축전지 공장의 기관실 공간에 여유가 없다는 점을 고려할 때에 발전시스템이 기관실 면적을 더 차지하지 않아도 되는 발전기 개조 방법이 가장 적합했다.

2. 전력공급 시스템의 개요

연구 대상의 전력공급 시스템 개략도와 구성요소는 Fig. 1 및 Table 1과 같다.

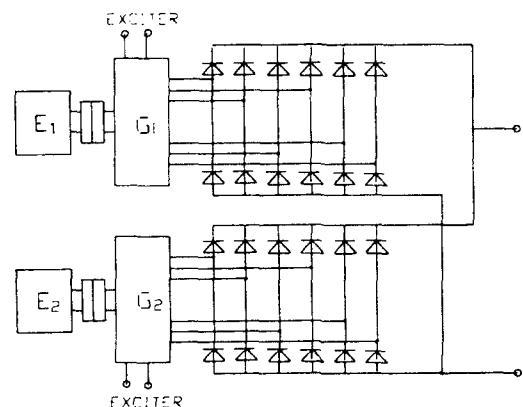


Fig. 1 Schematic diagram of the power supply system

Table 1 Element of power supply system

명칭	특기사항
원동기	형식 : 디젤엔진 정격회전수 : 800[rpm]일 때 60[Hz] 회전수 가변 범위 : 1200 1800[rpm]
발전기	형식 : 자여자식 4극 6상 교류발전기 Double three phase
컨버터	형식 : 6상 브리지 정류기 출력 : DC 100[kW] 전압 가변 범위 : 220[V] 340[V] 정격전류 : 400[A] 다이오드 : 형식 - SNK 320/12
연축전지	

3. 이론해석

3. 1 현팅의 원인

병렬운전하는 두 발전기의 특성은 같도록 제작되지만 두 발전기의 특성이 완전히 같을 수는 없으므로 현팅유발점에서 돌발적인 부하변동으로 인해 변화된 두 발전기의 각속도의 크기는 같을 수가 없다. 따라서 동기 발전기 유도기전력 $V_g = 4.44\varphi fw$ 에 의해 순간적으로 각각의 발전기에 생긴 유도기전력 V_g 의 크기에는 차이가 생기게 된다¹⁾. 그 결과 상대적으로 각속도가 빨라져 유도기전력이 커진 발전기(G₁)는 전력식 $P = I V_g \cos\theta$ 에 의해 공급전력이 커지므로 담당하는 부하도 증가하게 되어 각속도가 다시 늦어지게 되고 상대적으로

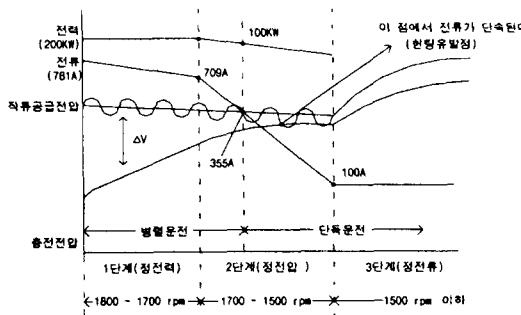


Fig. 2 Battery charging mode

각속도가 늦어졌던 상대편 발전기(G_2)의 부하는 줄어 들어 각속도는 빨라지게 되므로 부하는 다시 G_2 로 이동하게 된다. 이런 과정이 계속되므로 설정속도를 중심으로 회전수 지침이 상하로 요동하는 현팅 현상이 일어나면서 부하가 두 발전기 사이를 번갈아 이동하게 된다¹⁾. 그러나 가버너의 감도가 해당 제어시스템에 적합하다면 부하 변동만에 의해 생긴 현팅은 가버너의 정속도 유지력과 제동권선이나 자극편에 생기는 맴돌이전류 등의 제동작용에 의해 억제되므로 단시간에 소멸되어 설정속도로 안정된다. 그러나 낭비시간으로 인해 부귀환루프인 현재의 제어계가 부하변화인 입력과 출력과의 위상차가 180° 가되어 정귀환회^{2),3)}하거나 가버너의 감도가 너무 클 때 또는 디젤기관과 같이 원동기의 회전력이 주기적으로 변하는 경우에 그 주기가 발전기의 고유진동의 주기와 같거나 가깝게 접근해 있을 때에 생기는 공진 등과 같이 부하변동 이외의 원동기 회전력을 불균일하게 하는 요소가 존재할 때에는 현팅의 지속시간과 진폭이 확대되어 발전기 운전이 불가능하게 된다.

연구 대상인 1, 2호 발전기를 단독운전하면서 회전수를 1200[rpm]에서부터 1800[rpm]까지 변화시켰을 때의 여자전류, 부하전류 및 컨버터 출력전압의 변동에 따른 현팅 여부를 조사하여 현팅이 일어나는 회전수 범위만을 기록한 것이 Table 3인데 이 Table에서 현팅은 아래의 조건에서만 일어난다는 것을 알 수 있었다.

① 병렬운전 할 것

② 부하가 축전지일 것

Table 2 Battery charging mode

구 분	컨버터출력 전압[V]	전 류[A]		전 力[kW]
병렬 운전	정전력 256~282	781~709		200
단독 운전	정전압 282	709~100	709~355	200~100
단독 운전		355~100		100~28.2
정전류	282~336	100		28.2~33.6

연구 대상 시스템의 충전방식은 Fig. 2와 Table 2와 같다. 축전지 전압이 어느 수준까지 오른 후에 일정해지면서 전류는 급격히 감소하는 정전압충전구간(rpm이 1575~1650 범위)에서 현팅이 일어난다. 그러나 단독운전시에는 실제로 사용되는 대부분의 제어계와 같이 감쇠진동을 하는 것으로 보아 가버너의 감도는 적당하고 그 밖의 현팅 요인도 없다는 것을 알 수 있고 병렬운전시에도 정전압충전 구간에서만 현팅이 일어나는 것으로 보아 두 발전기의 전압조정기, 전압변동률에는 결함이 없고 현팅유발점에서의 두 발전기의 각속도 변화가 일치하지 않아서 현팅이 일어난다고 판단되므로 현팅 원인은 Fig. 2에 표시한 현팅유발점의 존재에 있다고 추정할 수 있다.

③ 회전수 범위가 1575[rpm] 1690[rpm]일 것
컨버터 출력전압과 축전지전압의 차가 큰 정전력충전 구간과 회전수가 낮은 구간에서는 현팅이 일어나지 않는다.

따라서 돌발적인 부하변동이 생기는 현팅유발점을 제거하면 현팅이 제거될 수 있을 것으로 판단하고 먼저 현팅유발점이 생기는 원인을 조사한 결과 아래와 같은 경우에 현팅유발점이 생기는 것을 알게 되었다.

3.2 현팅유발점이 생기는 경우

3.2.1 정전압 충전 구간에서 운전될 때
축전지 충전회로인 Fig. 3에서 R_g 를 발전기의 내부저항, R_B 를 축전지의 내부저항, R_L 을 도선의 저항, R_T 를 총저항이라고 하면 충전전류 I_C 는 식 (1)로 표시된다.

$$I_C = \frac{V_g - V_B}{R_g + R_B + R_L} = \frac{\Delta V}{R_T} \quad (1)$$

Table 3 RPM, voltage, exciting current and load current of alternator

1호 발전기						2호 발전기					
부하 상태	rpm	여자 전류	부하 전류	전압 [v]	현팅 여부	부하 상태	rpm	여자 전류	부하 전류	전압 [v]	현팅 여부
유	1560	1.95	268	259	무						
유	1575	1.53	198	257	무						
유	1575	1.1	30	250	무						
무	1575	2		327	무						
유	1575	1.67	222	258	유						
무	1575	2.2		330	무						
유	1575	1.8	248	258	유	유	1580	1.82	150	295	유
무	1580	1.4		303	무	유	1580	1.52	160	273	유
유	1580	1.21	139	255	유	유	1590	1.35	140	268	유
무	1580	1.6		312	무						
유	1580	1.38	170	255	무						
무	1590	1.09		289	무						
유	1590	0.97	96	253	무						
무	1590	1.20		253	무	무	1600	1.08		290	무
유	1600	2.1	280	263	유	유	1600	1.08	60	263	유
유	1650	2.08	320	278	유						

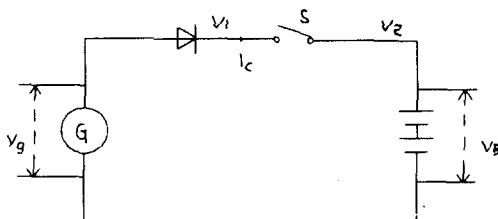


Fig. 3 Battery charging circuit

식 (1)에서 스위치 S를 투입하여 충전전류를 흘리게 하면 그림에서는 $V_1 = V_2$ 가 되지만 실제로 축전지에 전기가 충전되기 위해서는 V_g 는 $V_B (= V_2)$ 보다 V 만큼 높아야 한다.

연구 대상 시스템의 충전방식을 표시한 Fig. 2와 Table 2에서 알 수 있듯이 충전중에 충전전류가 감소하면 식 (1)에 의해 V 가 작아져서 컨버터의 출력전압 리플의 하부전압이 축전지전압보다 작아지는 점에서 순간적으로 충전전류가 흐르지 않게 되어 무부하 상태가 되는데 이점이 부하변동이 생기는 현팅유발점이 된다는 것을 알 수 있다.

3.2.2 발전기 회전수가 높은 불안정 영역에서 운전될 때

무부하시와 부하시의 기전력 차는 Fig. 4에서 알 수 있듯이 여자전류가 증가하여 계자철심이 포화

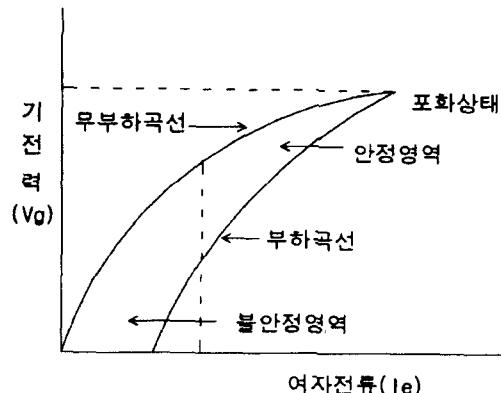


Fig. 4 Load and no-load saturation curves of alternator

될수록 감소하고(안정영역) 여자전류가 감소할수록(불안정영역) 증가한다. 따라서 불안정영역에서는 Fig. 4의 ΔV 가 작아져 현팅유발점이 생기기 쉬우나 회전수가 감소하면 여자전류는 증가하게 되어 자속포화상태인 안정영역에 들어 가므로 ΔV 가 커져 현팅유발점이 생길 가능성이 줄게 된다.

3.2.3 충전전류가 적게 흐를 때의 운전

식 (1)에서 대전류로 충전할 때는 V 가 커지므로 현팅유발점이 생기기 어렵고 충전전류가 감소하면 V 가 작아지므로 현팅유발점이 생기기 쉽다는

것을 알 수 있다.

4. 헌팅 억제 실험 및 고찰

지금까지의 내용에서 헌팅의 직접적인 원인은 헌팅유발점이 존재하기 때문이라는 것을 알 수 있고 헌팅을 방지하려면 헌팅유발점이 생기지 않도록 하면 될 것이므로 아래와 같은 방법들을 이용해서 헌팅유발점 소멸 여부를 조사한 결과 헌팅이 유발점이 소멸되는 것도 있었고 되지 않는 것도 있었다.

4.1 평활화 콘덴서(C)의 삽입

컨버터 출력전압의 리플을 줄이기 위해 Fig. 5와 같이 축전지 앞에 병렬로 용량이 $40000[\mu F]$ 및 $60000[\mu F]$ 의 콘덴서(C)를 차례로 삽입하여 실험해 본 결과 컨버터 출력전압의 리플 성분은 제거되어 평활화는 되었으나 콘덴서에 충전 되는 전압은 결국 $V_1 = V_C = V_B$ 가 되므로 식 (1)의 V 가 0이 되어 헌팅은 멈추지 않았다.

4.2 저항의 삽입

Fig. 6과 같이 C를 제거하고 축전지 앞에 직렬로

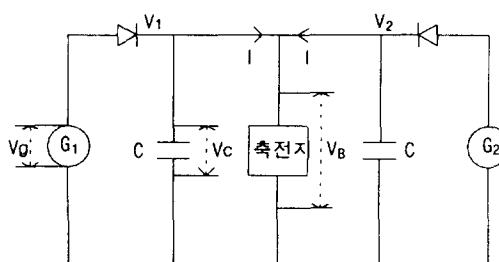


Fig. 5 Circuit of parallel condenser

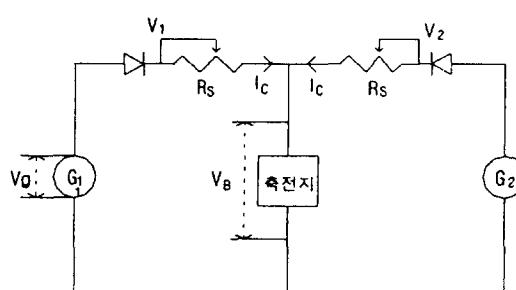


Fig. 6 Circuit of series resistor

저항을 삽입한 결과 헌팅이 없어졌고 삽입저항이 클수록 시스템은 안정됐는데 그 이유는 삽입저항 RS에 의해 생기는 전압강하로 인해 Fig. 3의 헌팅유발점에서 충전전압이 컨버터 출력전압의 리플 하부와 만나지 않을 정도로 감소되면서 ΔV 가 커졌기 때문이다. R_S 를 삽입저항이라 할 때에 그 관계를 수식으로 표시하면

$$V_B = V_1 - IR_S \quad (2)$$

가 된다. 실험에서 R_S 를 $0.1[\Omega]$ 로 했을 때에 최대부하시에 저항에 의한 전압강하와 각 발전기당의 전력손실은 아래와 같고 최대안정운전을 위한 최소 저항값은 $29[m\Omega]$ 이었다.

$$\text{전압강하} : 400[A] \times 0.1[\Omega] = 40[V]$$

$$\text{각 발전기당 전력손실} : 40[V] \times 400[A] = 16[kW]$$

그러나 저항을 삽입하면 저항에 의한 전압강하 때문에 발전기 정격출력전압이 감소될 뿐만 아니라 합계 $32[kW]$ 에 해당하는 열이 발생하므로 이 열을 흡수하기 위한 냉각장치가 필요하게 되므로 발전시스템이 차지하는 공간이 커지게 되어 이 방법은 사용할 수가 없었다.

4.3 리액터 설치

삽입저항에 의한 전력손실을 줄일 수 있을 것으로 판단되어 Fig. 7과 같이 축전지 앞에 직렬로 리액터⁵⁾($0.5[mH]$ 까지)를 설치해 실험한 결과 헌팅은 멈추지 않았다. 더 큰 용량의 리액터를 삽입해야 할 것으로 판단되나 리액터의 용적이 너무 커져 채

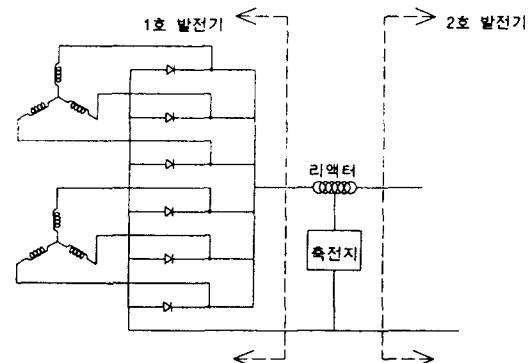


Fig. 7 Circuit of reactor

택하기가 곤란했다.

4.4 교류발전기의 개조

최후의 방법으로 교류 발전기를 아래와 같이 개조한 결과 헌팅이 제거되었는데 Table 3은 변경 전후의 상태를 비교한 표이다.

- ① 4극 6상에서 4극 12상으로 변경했다 즉 12 폴스 정류기에서 24 폴스 정류기로 개조하여 리플 전압을 줄여 헌팅유발점을 생기지 않게 했다.
- ② 계자권선의 코일 피치⁶를 5/6"에서 2/3"로 줄여

Table 4 Changing items of alternator

내 용	변경 전	변경 후
폴 스	12 폴스	24 폴스
극 수	4극	4극
상 수	6상	12상
계자코일 피치	5/6"	2/3"
폴 스 수	12	24
폴스의 위상각	30°	15°
리 플 올	1.03	0.26
컨버터의 출력전 압이 282[V]일 때의 리플전압(P-P)	9.72[V]	2.42[V]
폴스 주파수[Hz] (1800[rpm]일 때)	720 (12폴스×60)	1440 (24폴스×60)
폴스 주기[ms]	1.38	0.69
다이오드 수	12	24
전 압 변 동 율	크다	작다.
기 자 력	100%	120%(증가)
단 락 비	100%	110%(증가)
권 선 수	192[turn]	약 10% 증가시킴

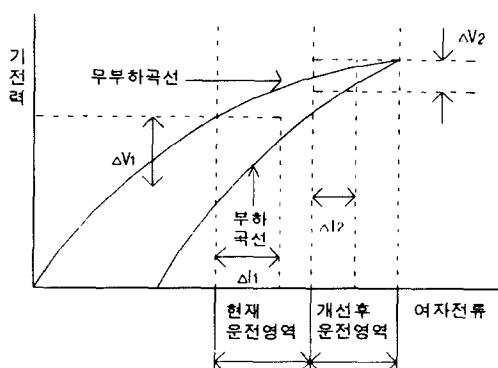


Fig. 8 Load and no-load characteristics of alternator

서 계자기자력을 약 20% 증가시켰기 때문에 단락비⁶가 약 10% 정도 상승되어 무부하시 및 부하시의 전압변동율이 작아져 무부하전압과 부하전압과의 차가 줄어들어 발전기가 준포화영역에서 운전이 되므로 더욱 안정된 운전이 가능해졌다. 이러한 관계를 Fig. 8에 표시했다. 여자전류 i_2 가 작을 때는 무부하시와 부하시의 기전력의 차 ΔV_1 가 커서 헌팅이 일어나기 쉽지만 철심이 자기포화될수록 부하에 의한 전압강하가 줄어들어 기전력의 차 ΔV_2 가 감소하므로 안정운전이 가능해 진다. 실험한 결과 330[V] 이상에서는 헌팅이 일어나지 않았다.

5. 결 론

본 실험에서 동기발전기의 상수를 증가시켜 리플전압을 감소 시키고 또한 계자의 권선수를 증가시키고 계자코일 피치를 줄여 기자력을 증가시키면 단락비가 증가되어 충전전압과 축전지전압과의 차가 커지므로 헌팅유발점이 생기지 않게 되어 발전시스템이 차지하는 공간을 증가시키지 않고도 헌팅을 제거할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

- 1) 森田豊 ; “船用電機の取扱と修理”, pp. 65~72
- 2) 石川博章 ; “電氣計算入門(4)”, pp. 100~101
- 3) RALPH J. SMITH & RICHARD C. DORF ; “CIRCUITS, DEVICES AND SYSTEMS”, pp. 282~284
- 4) 東京電氣大學 ; “自動制御の基礎”, pp. 152~153
- 5) 圖書出版 世和 ; “電子・電氣用語事典”, pp. 118, 421
- 6) 宮入壓太 ; “電氣・機械 Energy 變換工學”, pp. 123