

발전기 병렬운전을 위한 위상시스템 설계

오진석* · 오세준* · 전승환* · 이성근* · 백태실**

Phase System Design for Generator Parallel Running

J. S. Oh, S. J. Oh, S. H. Jun, S. G. Lee, T. S. Back

Abstract

In this paper, a phase system is implemented and applied to a diesel-generator.

This paper treats the analytical and experimental studies on the improvement of phase-detector circuit and phase-control method using a hybrid algorithm for the parallel running of diesel-generator.

This phase system is composed of the phase-detector and phase-controller. The parameters for the phase-controller are obtained by the transient-response tuning method, and this control scheme has a backward-shift operator.

The hybrid algorithm is used to check the performance of phase system through experiments.

The good experiment results show the direct control of the parallel running system may utilized in the PCMS (Power Control and Management System).

1. 서 론

산업기기 중에서 발전기는 전력을 공급하는 중요한 장치이다. 발전기는 원동기의 종류에 따라 디젤발전기(diesel generator), 터빈발전기(turbine generator), 수차발전기(water-wheel generator) 등으로 분류할 수 있다.

* 한국해양대학교 교수

** 포항1대학교수

본 연구에서는 선박 및 등대의 주발전기, 산업용 비상 발전기로 많이 사용되는 디젤발전기를 연구대상으로 하였다. 이러한 디젤발전기에 연동 되는 발전기는 동기발전기(synchronous generator)가 대부분이고, 동기발전기는 주파수, 극수만으로 결정되는 동기속도(synchronous speed)로 회전하며 발전한다. 동기발전기는 수력발전소, 화력발전소, 선박 등에 광범위하게 사용되고 있다.

일반적으로 선박에서는 배치성, 안전성, 보수성, 경제성 등의 측면에서 발전기를 2대 이상 탑재하여 부하에 따라 단독 혹은 병렬로 발전기를 운전한다. 2대 이상의 발전기를 병렬로 연결하여 부하에 전력을 공급하는 운전방법을 병렬운전(parallel running)이라 한다. 발전기는 출력의 85% 부근에서 최대효율을 내도록 설계되므로 대용량 발전기 1대를 탑재하여 운전하는 경우보다 2대 이상을 탑재하여 부하의 경중에 따라 단독과 병렬운전을 병행하면 고효율 운전을 할 수 있으며, 페일세이프 운전을 할 수 있다.

발전기를 병렬운전하기 위해서는 다음의 세 가지 조건을 만족해야 한다.

첫째, 전압의 위상이 일치해야 한다.

둘째, 각 발전기의 기전력의 크기가 같아야 한다.

셋째, 주파수가 같아야 한다.

선박에 사용되는 발전기는 위의 조건 외에 전압의 파형과 상회전도 일치해야 하지만, 발전기의 특성상 병렬운전에 큰 영향을 주지는 않는다.

본 연구에서는 기존의 아날로그 방식의 위상제어감지시스템을 발전기 제어관리시스템인 PCMS(Power Control and Management System)에 연동이 용이하도록 하이브리드 방식으로 설계하고자 한다. 설계된 시스템을 이용하여 위상검출과 위상제어에 필요한 다양한 실험을 수행하여, 노르웨이 등의 선진국에서 독점하여 공급하고 있는 PCMS 분야의 설계기술을 확보하는 것이 연구의 목적이다.

2. 위상시스템

위상은 전기적인 각도 차를 말하며 파형의 상대적 위치관계를 나타내는 것이다. 그리고 위상 차는 신호간의 앞섬(lead)과 뒤짐(lag)의 정도를 각도(도수)로 나타낸 것이다.

본 연구에서 연구대상은 위상에 관련된 것이며, 그밖에 각 발전기의 기전력의 크기와 주파수는 같은 상태에서 위상시스템을 설계하고자 한다.

두 대의 발전기 G_1 과 G_2 의 기전력 크기와 주파수가 같고 위상이 다른 경우의 연구과정에 필요한 위상검출 및 위상제어에 관련된 내용을 정립하여 이를 근거로 위상시스템을 설계하고자 한다.

지금 발전기 G_1 이 출력하는 기전력 E_1 의 위상이 발전기 G_2 가 출력하는 기전력 E_2 의 위상보다 $\Delta\phi$ 만큼 앞선 경우의 기전력과 전류관계를 도시하면 그림1과 같이 도시할 수 있다.

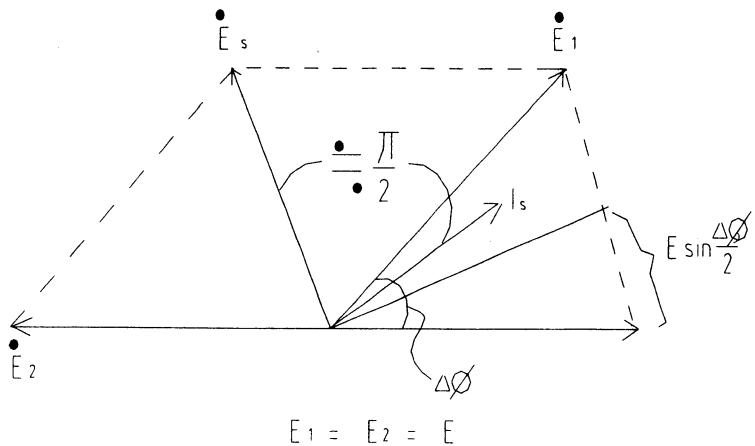


그림 1. 기전력과 전류에 대한 벡터량 표현.
Fig. 1 The definition of vector for E and I

그림1에서 두 발전기의 순환전류 I_s 가 합성기전력 E_s 보다 약 $\pi/2$ 만큼 뒤지며, E_1 에 대해서는 약 $\Delta\phi/2$ 만큼 뒤지며, E_2 에 비해서는 대략 $(\pi - \Delta\phi)/2$ 만큼의 위상 차를 갖는다. 이러한 I_s 가 발전기 G_1 , G_2 에 의해 전력 P_1 , P_2 를 발생한다. 그림1을 이용하여 I_s , P_1 , P_2 를 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_s = E_s / 2Z_s = 2E \sin(\Delta\phi/2) / 2Z_s = E \sin(\Delta\phi/2) / Z_s \quad (1)$$

$$P_1 \doteq E I_s \cos(\Delta\phi/2) = E^2 \sin \Delta\phi / 2Z_s \quad [\text{W/Phase}] \quad (2)$$

$$P_2 \doteq E I_s \cos(\pi - \Delta\phi/2) = -E^2 \sin \Delta\phi / 2Z_s \quad [\text{W/Phase}] \quad (3)$$

이때 $E_1 = E_2 = E$ 이다.

식(1), 식(2), 식(3)에서 알 수 있는 바와 같이 무부하 상태일 때는 순환전류 I_s 가 통합으로 G_1 발전기는 P_1 에 해당하는 전력을 출력하는 발전기로, G_2 발전기는 P_1 에 해당하는 전력을 흡수하는 전동기가 된다. 그리고 부하가 걸린 상태에서 병렬운전 중이라면 발전기 G_1 은 P_1 의 부하가 증가한 경우이고, 반대로 발전기 G_2 는 P_1 의 부하가 감소한 경우가 되므로 G_1 이 출력하는 기전력 E_1 의 위상은 늦어지고, G_2 가 출력하는 기전력 E_2 의 위상은 빨라진다. 이러한 현상은 두 발전기의 위상을 일치시키는 힘으로 작용한다. 이러한 역할을 하는 순환전류 I_s 를 동기화전류(synchronizing current)라 하고, I_s 는 두 발전기 기전력의 위상 차에 의해 변화하며, 이 과정에서 위상 차를 일치시키려는 힘인 동기화력 P_s 는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다. 식(4)에서 P_s 는 $\Delta\phi = 0$ 에서 최대가 되고, $\Delta\phi = \pi/2$ 에서 “0”이 된다. 그리고 위상 차가 $\Delta\phi > \pi/2$ 일 때는 P_s 가 부가되어 위상 차를 증가시켜 동기이탈(step-out)을 일으켜 병렬운전이 불가능해진다.

이러한 위상 차를 이용하여 발전기의 부하분담을 조정하며, 위상 차를 조정하기 위하여 조속

기를 이용한다.

본 연구에서는 PCMS에 연동이 가능한 시스템으로 위상검출기와 위상제어기가 포함된 위상 시스템에 대하여 앞에서 언급한 발전기 병렬운전 특성을 근거로 설계하고자 한다

2.1 위상검출기

그림1과 같은 위상조건에서 임의의 진폭이 동일한 경우의 기전력 E_1 및 기전력 E_2 의 시간을 t_1, t_2 라고 하면, 발전기 기전력간의 위상 차 $\Delta\phi$ 를 한 주기 T 에 대한 비율로 나타내면 식(4)와 같다.

$$\Delta\phi = 360^\circ \cdot (t_2 - t_1)/T \quad [\text{rad}] \quad (4)$$

식(4)의 위상 차 $\Delta\phi$ 를 검출하기 위하여 위상검출기 회로를 이용한다. 위상검출기는 식(5)와 같이 위상 차에 비례하는 출력전압 V_D 를 얻을 수 있도록 회로를 설계한다.

$$V_D = K_\phi \cdot \Delta\phi \quad (5)$$

식(5)에서 K_ϕ 는 위상검출기의 변환비(V/rad)이다. 아날로그 방식의 위상검출기는 DBM(Double-Balanced Mixer)을 사용하는 반면에 본 연구에서는 베타적-OR 방식과 소프트웨어 방식을 혼용한 하이브리드 방식으로 설계하고자 한다.

하이브리드 방식의 신호검출부는 그림2의 (a)와 같이 구성하였다.

대칭성을 갖는 입력신호(버스 전원, 발전기 전원)들을 위상 차가 듀티 사이클(duty cycle) α 의 50% 범위 내에서만 활용이 가능하다. 이러한 위상검출기의 출력펄스 폭은 그림2의 (a)에 입력되는 입력신호들의 위상 차에만 영향을 받으며, 파형은 그림2의 (b)와 같다. 그림2의 (b)에 도시한 출력 파형 V_0 는 식(6)에 나타낸 것과 같이 α 에만 관계된다. 이 때 V_M 은 논리상태가 1인 경우의 최대출력전압이다,

$$V_0 = V_M \cdot \alpha \quad (6)$$

그림2의 (c)는 위상검출기의 평균출력전압을 두 입력신호의 위상 차에 대한 함수로 도시한 것으로 삼각파 특성을 갖는다. 즉, 위상 차가 0(rad)에서 π (rad)로 증가함에 따라 출력 파형의 전압은 선형적으로 증가하며, $\Delta\phi = \pi$ 에서 최대 값이 된다. 이 범위에서 직선의 기울기가 식(5)의 변환비 K_ϕ 가 된다.

V_0 는 RC필터를 통하여 위상 차에 해당하는 위상회로에 표시된다. RC필터의 고유주파수 ω_n , 제동계수 ξ 는 식(8)과 같다.

$$\omega_n = \sqrt{K_\phi \cdot K_o \cdot \omega_c} \quad [\text{rad/sec}] \quad (7)$$

$$\xi = 1/2 \sqrt{\omega_c / (K_\phi \cdot K_o)} \quad (8)$$

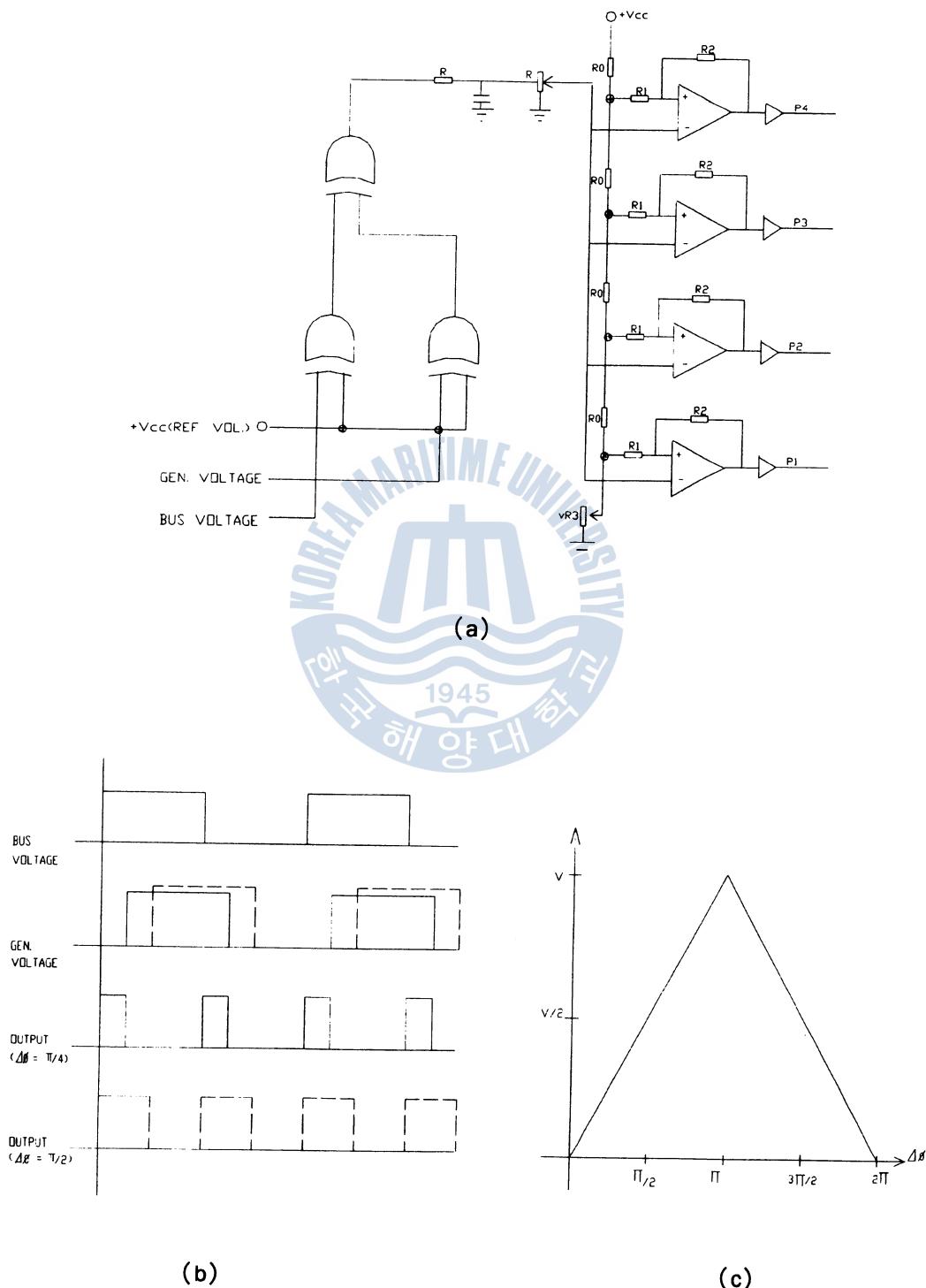


그림 2. 위상검출기 (a) 회로 (b) 파형 (c) 입. 출력 특성
Fig. 2 Phase detector (a) circuit (b) waveform (c) I/O properties

식(7)의 $\omega_c = 1/RC$ 이고, K_o 는 출력전압의 주파수 변환계이다. RC필터를 사용하면 제동계수 ξ 가 감소함에 따라 정상상태로 될 때까지 진동하는 시간이 멀어진다. 본 연구에서는 과도응답이 정상상태 값의 10%이내가 되는데 걸리는 시간인 정정시간 내에 오버슈터가 제한되도록 설계한다. 설계과정에서 제동계수 ξ 는 0.5로 하였고, 실험을 통하여 K_o 는 3.82, K_s 는 5.94로 하였다.

RC값은 출력 파형이 일정한 출력 값을 갖도록 결정하였고, 이 때 시정수는 회로의 시정수 범위내인 44ms로 하였다. 실제 실험에 이용한 R값은 $22\text{K}\Omega$, C는 $2\mu\text{F}$ 으로 하였다.

위상 차 지시부는 그림2의 (a)에 도시한 것과 같이 반전 슈미트 트리거회로를 이용하여 출력이 양의 포화일 때 UTP(Upper Trip Point)를 결정하고, 음의 포화일 때 LTP(Lower Trip Point)를 결정함으로서, 두 트립점 사이에 히스테리시스(hysteresis)를 갖도록 하여 노이즈 등에 오동작이 발생하지 않도록 하였다.

2.2 위상제어기

발전기를 병렬운전 하기 위하여 위상을 일치시켜야 한다. 위상을 일치시키기 위하여 위상을 제어하여야 하며, 이를 위해 주파수를 조정해야 한다.

일반적으로 발전기 시스템에서 주파수를 조정하기 위하여 가버너를 이용하며, 이 때 주파수 조정구간은 병렬운전을 위한 구간과, 버스(bus) 주파수 일정제어 구간으로 분류된다.

병렬운전을 위한 조정구간은 버스 주파수 일정제어 구간 직전까지 행하여지는 것으로 위상

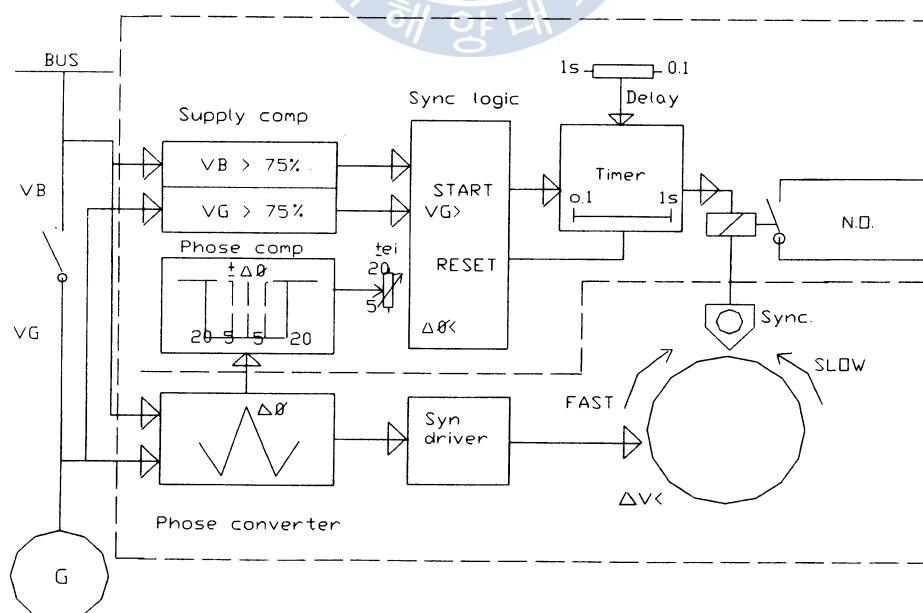


그림 3. 발전기 위상제어 흐름도
Fig. 3 Generator phase control diagram

제어기의 제어 정밀도에 크게 영향을 미치지 않는다.

병렬운전을 위한 조정구간은 선박용 발전기의 정격 주파수인 60Hz의 $\pm 0.4\text{Hz}$ 범위 이내로 조정이 가능해야 한다. 그림3은 발전기 위상제어의 흐름도를 도시한 것이다. 그림3에 나타낸 것과 같이 발전기와 버스의 전압이 75%이상 되는 구간에서 병렬운전을 준비하며, 제어과정에서 차단기 투입신호를 출력할 때 릴레이의 delay 시간을 고려해야 한다.

그림4는 위상제어를 위한 가버너의 제어흐름도를 도시한 것으로, 제어 알고리즘은 식(9), 식(10), 식(11)에 기술한 BRI(Backward-Rectangular Integration)법을 적용한 순환 알고리즘으로 PID제어기를 구현하였다. 지령위상에 대한 추종위상을 BRI법을 적용하여 차분방정식으로 표현하면 식(9)과 같다.

$$U(kT) = K_P(e(kT) + T/T_1 \sum_{i=1}^k e(i-1) + T_D/T(e(kT) - e(k-1))T) \quad (9)$$

T : sampling time , k = 0, 1, 2,

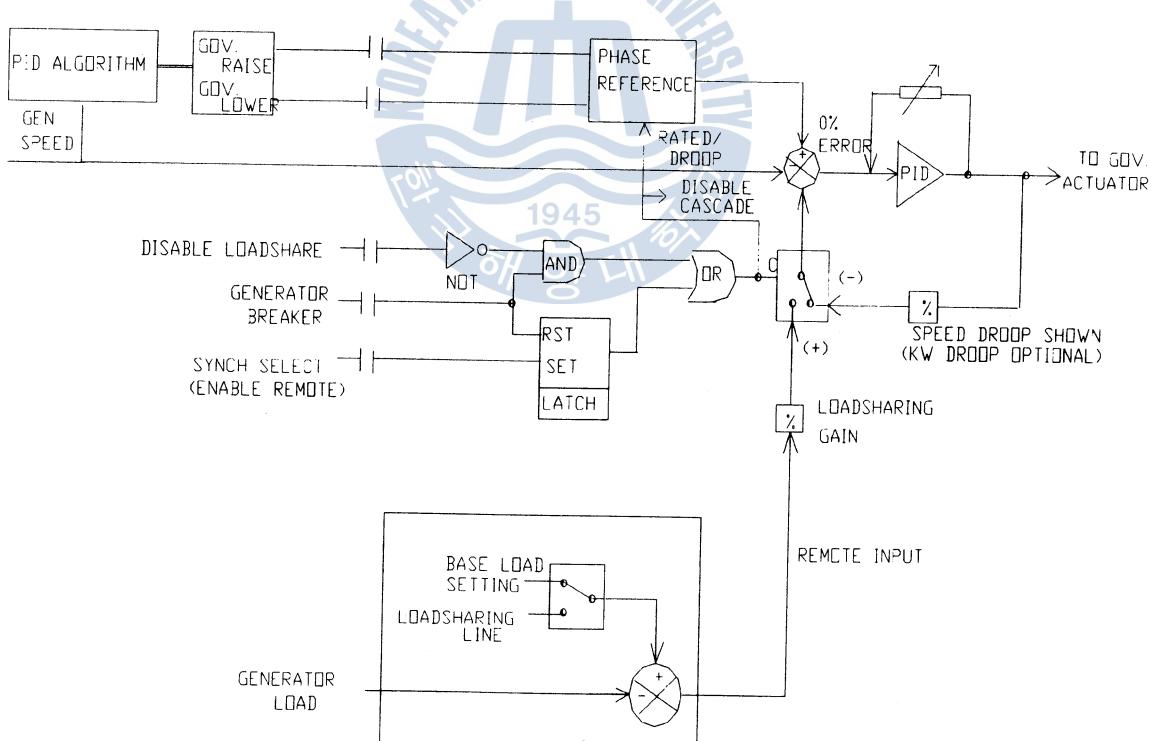


그림 4. 병렬운전 위상제어 시스템
Fig. 4 Phase control system of parallel running

식(10)은 1 sampling 주기전의 오차와 위상관계를 나타내고 있는 비순환 알고리즘으로, 바꾸면 식(11)과 같이 된다.

$$U((k-1)T) = K_P e((k-1)T) + K_1 T \sum_{i=1}^{k-1} e(i-1) + K_D / T (e((k-1)T) - e((k-2)T)) \quad (10)$$

$$U(kT) - U((k-1)T) = Ae(kT) + Be((k-1)T) + Ce((k-2)T) \quad (11)$$

$$A = K_P + K_D / T = K_P + K_P T_D / T$$

$$B = K_1 T - 2K_D / T - K_P = K_P T / T_1 - K_P - 2K_P T_D / T$$

$$C = K_D / T = K_P T_D / T$$

식(9), 식(10), 식(11)에서 $U(kT)$, $e(kT)$ 은 제어량과 오차값이며, K_P 는 비례감도, T_1 , T_D 는 적분시간 및 미분시간이다.

또한, 발전기 병렬운전 과정에서 전압과 주파수는 같고, 위상만 다를 때는 그림5의 P_1 , P_2 , P_3 에 걸리는 전압은 다르게 된다.

발전기 G_1 의 전압벡터를 \dot{U}_1 , \dot{V}_1 , \dot{W}_1 발전기 G_2 의 전압벡터를 \dot{U}_2 , \dot{V}_2 , \dot{W}_2 라 하면, P_1 , P_2 , P_3 에 걸리는 전압벡터는 \dot{PE}_1 , \dot{PE}_2 , \dot{PE}_3 는 식(12), 식(13), 식(14)와 같이 된다.

$$\dot{PE}_1 = \dot{U}_1 - \dot{U}_2 \quad (12)$$

$$\dot{PE}_2 = \dot{V}_1 - \dot{W}_2 \quad (13)$$

$$\dot{PE}_3 = \dot{W}_1 - \dot{V}_2 \quad (14)$$

발전기 G_2 의 위상이 발전기 G_1 의 위상보다 60° 및 120° 앞설 경우의 전압벡터도는 그림5

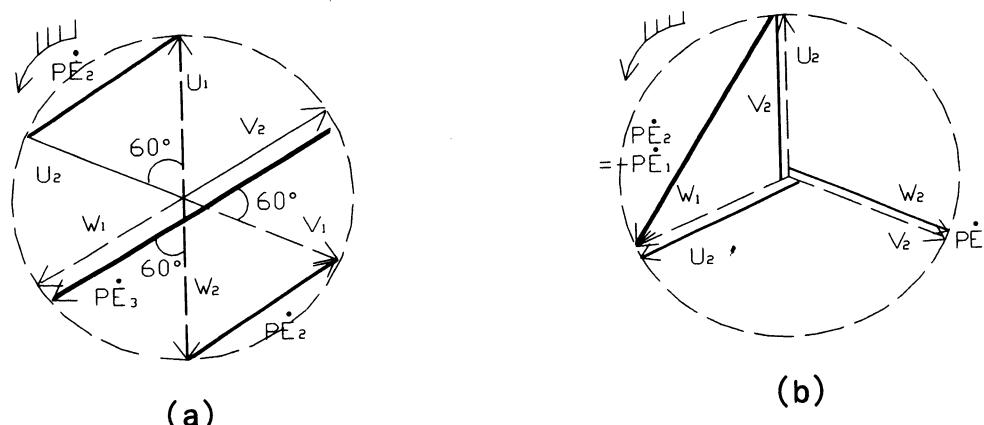


그림 5. 전압벡터도 (a) 60° (b) 120°
Fig. 5 Vector diagram of voltage (a) 60° (b) 120°

(a), (b)와 같다.

표1은 PE₁, PE₂, PE₃의 변화를 정리한 것이다.

표 1. PE1, PE2, PE3 전압특성
Table 1 Voltage properties of PE1, PE2, PE3

$\Delta\phi$	PE ₁	PE ₂	PE ₃
0	0	$\sqrt{3}V$	$\sqrt{3}V$
60	V	V	2V
120	$\sqrt{3}V$	0	$\sqrt{3}V$
180	2V	V	V
240	$\sqrt{3}V$	$\sqrt{3}V$	0
300	V	2V	V
360	0	$\sqrt{3}V$	$\sqrt{3}V$

표1에서 알 수 있는 바와 같이 발전기 G₁, G₂의 위상이 일치한 동기상태($\Delta\phi = 0^\circ$)가 되면 PE₁=0, PE₂=PE₃= $\sqrt{3}V$ (V는 발전기상전압)가 된다. 이때 발전기 병렬운전을 위한 차단기 투입신호가 출력하고, 병렬운전을 완료한다.

3. 실험 및 고찰

버스 전압(AC110V)과 발전기 전압(AC 110V)을 AC 20V로 감압시켜 위상검출기에 입력신호로 공급한다. 공급된 입력신호는 배타적-OR회로를 거쳐 RC회로에 입력된다. RC회로를 거쳐 VR₃에 걸린다. VR₃는 반전 슈미트 회로의 “-”단자에 최고전압을 제한하는 역할을 한다.

그림2의 (a)에서 출력단자 P₁, P₂, P₃, P₄의 위상차별 출력상태는 표2와 같다.

표 2. 위상검출기 출력단자 상태
Table 2 State of phase detector terminal

항목 위상차(Hz)	출력 단자			
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄
$\Delta\phi = 0$	1	1	1	1
$\Delta\phi = 0.20$	0	1	1	1
$\Delta\phi = 0.25$	0	0	1	1
$\Delta\phi = 0.40$	0	0	0	1

표2에 나타난 것과 같이 P₁, P₂, P₃, P₄의 출력특성을 이용하여 발전기 병렬운전에 필수조건인 위상일치점을 구한다. 그림7의 (a), (b)는 P₁, P₂, P₃, P₄의 출력 파형이다.

그림6은 표2의 출력상태를 나타내고 있으며, 이것은 그림2의 b에 나타낸 것과 같이 위상검출기 출력은 위상차에 따라 변함을 알 수 있다. 동기신호($\Delta\phi=0$)일 때 조건은 P₁, P₂, P₃, P₄ 모두가 “HIGH”상태임을 알 수 있다. 발전기 병렬운전은 병렬운전 조건을 만족시켜 자동차단기를 투입하기 위한 것이다. 병렬운전 조건 중에서 위상만 차이가 있을 때, 자동차단기 투입을 위해,

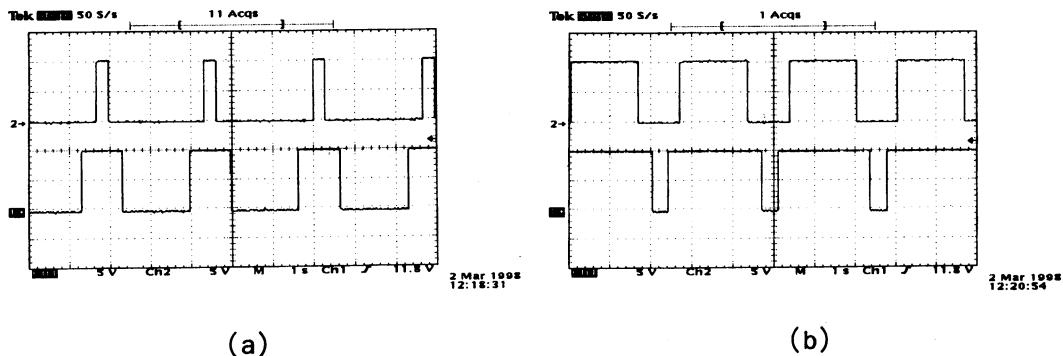


그림 6. 위상검출기 출력 파형 (a) P₁, P₂ (b) P₃, P₄

Fig. 6 Phase detector output waveform (a) P₁, P₂ (b) P₃, P₄

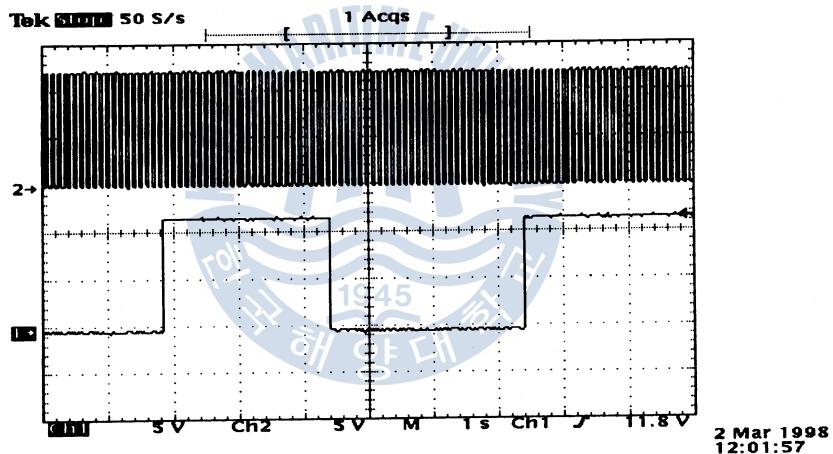


그림 7. 진상판별회로의 파형 (FAST 0.4Hz)

Fig. 7 Waveform of lead phase define circuit (FAST 0.4Hz)

버스에 비해 발전기의 주파수가 빨라야한다. 이러한 조정은 위상제어기에서 수행한다. 일반적으로 위상을 감지하는 동기검정기(synchroscope)의 회전 방향이 시계방향이 되어야 한다. 이를 위해 진상판별회로를 이용한다. 그림7은 0.4Hz 진상(fast)일 때의 진상판별회로 출력파형이다.

그림7은 위상검출기의 위상일치점을 나타내는 펄스가 일정기간 출력될 때마다 진상판별회로의 출력파형이 변함으로 표2의 $\Delta\phi=0$ 조건과 진상판별회로의 출력조건이 AND 조건을 만족하면, 병렬운전을 위한 자동차단기 투입신호를 출력해도 됨을 나타내고 있다.

본 연구에서는 MC14013B를 사용하여 버스 측 신호는 데이터 값으로, 발전기 측 신호는 클럭 값으로 하여 완벽한 동기 상태를 $\pm 0.3H$ 범위 내에서 검출하여, 발전기 위상제어를 수행하였다.

4. 결 론

본 연구 핵심은 선박용 발전기 병렬운전과정에서 제어대상이 되는 중요한 항목 중의 하나인 위상을 검출하고 제어하는 것이다. 연구수행 과정에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 배타적-OR회로를 이용하여 위상일치점을 구하고, 병렬운전은 소프트웨어로 처리하는 하이브리드 방식을 채택함으로써 제어의 유연성을 확보할 수 있었다.
2. 하이브리드형 위상검출기는 엣지-트리거형에 비하여 대칭성을 확보할 수 있으므로 위상 검출기 변환이득을 선형적으로 구할 수 있었다.
3. 연구과정에서 제시된 위상검출회로는 발전기제어영역인 $\pm 0.4\text{Hz}$ 구간에서 정확히 동작하였으며, 위상제어기는 위상검출기와 연동하여 병렬운전을 원활히 수행함을 알 수 있었다.

그 밖에 위상제어 알고리즘은 선박용 발전기 제어시스템에 보편적으로 사용되고 있는 PID 알고리즘을 적용해본 결과, 제어요구조건을 만족하였다. 이상의 연구결과를 이용하여 실용화 실험을 계속 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] DEIF Members, "LED Synchrosopes and check synchronizing relay", 1997.
- [2] R.J.Smith, "Circuits, devices and systems", John wiley & sons, Inc, 1984.
- [3] 오진석, "Design of Controller for Electric Propulsion Motor Controller", 국방과학연구소, Oct. 1991
- [4] B.K.Bose, "Power Electronics and AC Drives", Prentice-Hall, pp. 1~165, 1986.
- [5] Prof.J.T. Boys, Ph.d., M.I.P.E.N.Z., and S.J Walton, B.E., "A loss minimized sinusoidal PWM inverter", pp. 260~268, IEE PROCEEDINGS, Vol. 132, Pt.B, No.5 Sep. 1985.
- [6] C. A. Karybakas and C.A. Kosmatopoulos, "Filter Design Method for a PWM Feedback Inverter System", pp. 364~372, IEEE Trans. on Ind., Vol. 40, No.3, June 1993.

