

선내 자동 부하분담 제어시스템에 관한 연구

이효성*, 임용곤**, 이흥호*
 충남대학교, 한국해양연구원

A Study of the Control System for a Auto Loadsharing of the ship

Lee Hyo Sung*, Lim Yong Kon**, Lee Heung Ho*
 Chung-nam National Univ.*, KORDI

Abstract - As the energy and manpower saving in ship have been prominent figures since oil shock, reasonable operation modes of propulsion and generating plants were made a through study for the practical use. Through the results of it, advanced countries developed the load-sharing system for the generator automation and could be realized the energy and manpower saving in ship.

1. 서 론

선박의 운항비 중에서 대부분을 차지하는 원유가 상승으로 인하여 에너지 절감기법이 중요하게 대두되었다. 또한 인건비 상승으로 인한 최소한의 인원으로 운항할 수 있는 자동화 설비가 더욱 필요하게 되었다. 이를 해결하기 위한 실용적 연구방안의 일환으로 주기관 및 발전장치에 대한 운전모드의 합리화를 추구하기 위하여 자동부하분담장치를 개발하게 되었다. 본 연구에서는 자동부하분담장치의 개발을 위한 기초연구로서 관련 수집, 분석하고 발전장치의 운전모드 및 제어제측기술에 대한 이론적 배경을 정립하고, 나아가 이를 토대로 하여 제동에 대한 하드웨어 및 제어논리를 실현시키기 위한 디지털 논리회로를 설계함으로써 발전장치의 자동부하분담장치 개발에 따른 신기술을 확보하여 관련업체에 보급하고 자동화선 및 에너지절감 선박의 개발에 활용하는 것을 목표로 한다.

2. 본 론

2.1 선내 디젤발전 장치의 제어방식

2.1.1 선내 발전 시스템

선박의 발전시스템에는 주로 디젤발전기, 터보발전기 및 축구동발전장치 등이 주로 사용된다. 이들 중에서 터보발전기와 축구동발전기는 항해 중에만 사용할 수 있기 때문에 디젤발전기와 조합하여 계통이 구성되어져야 한다. 선박의 종류에 따라서 다소 차이는 있으나 선내 전력소비량은 항해시보다 하역 시 및 입출항시에 더 많이 소요된다. 따라서 선내발전 시스템에 대한 운전방법으로서는 항해 중에는 어느 한쪽의 단독운전 혹은 경우에 따라서는 운항비가 저렴한 발전기와의 형태로서 운용되고, 하역 시 및 입출항시에는 디젤발전기 단독운전 혹은 병렬운전 형태로서 수요전력을 감당하게 된다. 그러나 항해 중에 선내 수요전력이 증가하는 경우에는 디젤발전기의 단독운전을 병렬운전으로 하거나 터보발전기를 위한 보일러의 추가구동 또는 디젤발전장치로 전환 등이 이루어진다. 이와 같은 운전을 원활히 수행하기 위한 발전제어장치의 구성요소로서는 자동기동/정지, 동기투입, 비례배분제어 및 자동부하분담제어 등이 있으며, 이들에 대한 제어방식 및 제어원리에 대한 이론적 배경을 개략적으로 기술하면 다음과 같다.

2.1.2 발전장치의 제어방식

일반적으로 발전시스템은 제어시스템, 정보시스템 및 안전 시스템 등으로 구분되어진다. 여기서 제어시스템은 신호를 취급하는 방식에 따라서 시퀀스제어, 아날로그 양만을 취급하는 아날로그제어 및 발전기 운전대수 제어와 부하배분 비율제어에 관련된 운전관리 제어 등으로 구분된다.

제어 방식	Sequence 제어	Analog 제어	운전관리제어
A	릴레이 및 반도체소자에 의한 Wired Logic	Analog 제어기기	Manual
B	Sequence Controller	Analog 제어기기	Manual
C	Sequence Controller	Analog 제어기기	Microcomputer
D	Microcomputer	Microcomputer	Microcomputer

표.1 발전장치의 제어방식

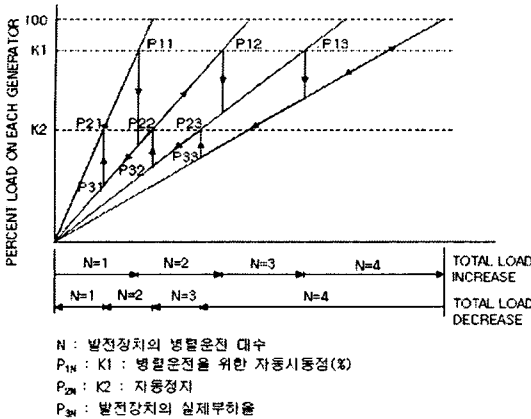
A방식은 개발초기에 주로 사용되던 방식으로 부피가 크고, 제어대상이 큰 경우에는 회로가 복잡하여 신뢰성이 저하되고, 설계상의 표준화가 되어있지 않아 유지보수가 어렵다. B방식은 하드웨어가 표준화되었고 대폭적인 LSI 화에 의한 부품개수의 감소, 자기진단 기능을 부여함에 따라 신뢰성이 많이 향상된 방식이다. 그러나 운전관리 제어의 경우에는 아날로그의 제어량이 많기 때문에 자동화하기에는 많은 문제점이 있다. C방식은 시퀀스 컨트롤러 및 표준화된 아날로그 제어기기에 마이크로프로세서를 조합시켜 운전관리제어까지도 자동화한 방식으로써 근래에 이르기까지 가장 널리 사용해오던 방식이다. D방식은 발전기제어를 모두 마이크로컴퓨터에 의존하는 제어방식으로써, 이는 시스템에 대한 자유도가 높고, 하드웨어가 간편하다는 장점은 있지만 소프트웨어의 개발에 많은 시간이 필요하다는 점과 시스템의 Redundancy와 Back-up에 대한 대책을 충분히 고려하지 않으면 고장시에 발전장치의 제어가 불가능하다는 단점을 가지고 있다. 위에서 언급한 네 가지 방식에 대하여 어떤 방식을 채용할 것인가에 대해서는 발전시스템의 규모에 따라 결정되어져야 할 것이다. 그러나 고도의 정밀도를 원하거나 선박의 자동화를 피하기 위해서는 마이크로컴퓨터를 도입한 C 혹은 D방식을 채용해야 한다. 따라서 본 연구에서 설계 개발하고자 하는 방식은 D방식을 목표로 하였다.

2.2 발전장치의 대수 및 자동부하분담제어

2.2.1 발전장치의 대수 제어

본 제어기능은 선내 소요전력이 급증하거나 급감하는 경우 발전장치의 과부하에 대한 보호와 연료효율을 높이고, 선내의 연속적인 양질의 전원을 공급하는데 목적이 있다. 이를 제어하기 위한 요건들에 대한 제약조건은 다음과 같다.

- a) 시동을 위한 부하율의 구간 : 50~100%(병렬운전)
- b) 시동에 소요되는 시간 : 0~30초 이내
- c) 정지를 위한 부하율의 구간 : 50~100%
- d) 정지에 소요되는 시간 : 0~2400초(40분)



N : 발전장치의 병렬운전 대수
 P_{1N} : K1 : 병렬운전을 위한 자동시동점(%)
 P_{2N} : K2 : 자동정지
 P_{3N} : 발전장치의 실제부하율

그림.1 발전장치의 대수제어 원리도

가. 자동시동

발전장치의 대수제어를 위한 자동시동은 그림.1에서 보는 바와 같이 선내 수요전력이 증가함에 따라서 증가하게 되는 경우 발전기에 대한 부하율이 K1(%)에 이르게 되면 K1 타이머에 의해서 시동을 위한 신호가 발생하여 선내 수요전력을 감당하기 위한 신호를 발생하여 선내 수요전력을 감당하기 위한 대상 병렬운전 발전기가 자동으로 시동하게 된다.

나. 자동정지

발전장치의 대수제어를 위한 자동정지는 그림.1에서 보는바와 같이 선내 수요전력이 감소함에 따라 발전장치의 부하율도 함께 감소하게 된다. 이때 병렬 운전되고 있는 발전기의 부하율이 K2에 이르게 되면 K2 타이머에 의해서 정지신호가 출력되어 병렬 운전되고 있는 발전기 1대가 정지하게 된다. 정지시키는 순서로서는 우선 ACB를 차단한 다음 원동기를 정지시킨다.

2.2.2 자동분담제어

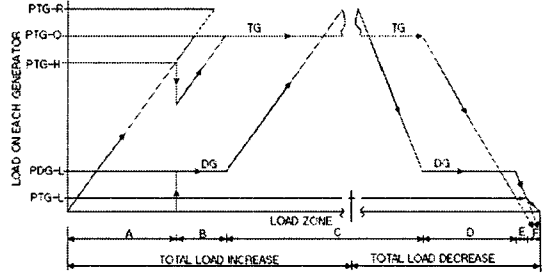
가. 비례배분제어

선내에 공급되어질 전체의 전력량은 병렬운전하고 있는 발전기들에 의하여 분담되어진다. 이들 발전기에 투입되는 부하율은 분담률에 비례하여 배분되어야 한다. 또한 병렬운전에 투입된 각 발전기의 분담률이 모두 같을 경우에는 이들의 부하배분은 발전기의 정격출력용량(KW)의 비율에 비례한다.

나. 최적 부하분담제어

본 제어는 선내에 디젤발전기, 터보발전기 및 축구동발전기 등이 설치되어져 있는 경우, 마이크로컴퓨터를 이용하여 운용비 및 유지비가 적게 드는 터보발전기 및 축구동발전기에 부하분담을 많이 함으로써 선내 전력생산에 경제성을 꾀하기 위한 수단이다. 이에 대한 원리도는 그림.2와 같다.

- 1) 부하영역 A : 본 영역에서는 터보발전기만으로 단독 운전하고 있을 때 선내부하가 증가하여 터보발전기의 부하율이 PTG-M에 이르게 되면 K1의 타이머가 작동하여 디젤발전기를 자동 시동하여 병렬운전에 투입하게 된다.
- 2) 부하영역 B : 본 영역에서는 디젤발전기의 부하율이 저부하 한계치인 PDG-L에 이르게 되면 남은 부하는 터보발전기에 부담된다. 이때 각 발전기들에 대한 부하분담목표 설정은 다음과 같다.



PTG-R : rated output of TG in KW
 PTG-O : conventional rated output of TG in KW for control purposes
 PTG-H : stand-by start request point in KW, set in % of PTG-O
 PTG-L : low load limit of TG in KW, set in % of PTG-O
 PDG-L : low load limit of DG in KW, set in % of DG's rated output

그림.2 최적부하분담제어에 대한 원리도

- 3) 부하영역 C : 본 영역에서는 터보발전기의 부하율이 PTG-O에서 일정하게 유지되면 나머지 부하는 디젤발전기에 분담되어진다. 이와 같은 부하영역을 제어하기 위해서는 병렬운전에 투입된 각 발전기의 목표 부하 분담치는 마이크로컴퓨터에 의해서 다음과 같은 방법으로 계산된다.
- 4) 부하영역 D : 선내 전체부하 PL이 감소하게 되어 디젤발전기의 부하가 저부하 한계치인 PDG-L 보다도 더 작게 되면 터보발전기의 최적 부하분담제어는 무시하게 된다. 반면에 디젤발전기가 PDG-L로 일정하게 유지되면 터보발전기는 나머지 부하를 분담하게 된다. 따라서 이 영역에서의 각 발전기들의 부하분담 목표는 부하영역 B와 같다.
- 5) 부하영역 E : 터보발전기의 부하는 PL이 최저부하 한계치인 PTG-L에 까지 감소하면 디젤발전기의 최저 부하한계 제어기능은 무시된다. 반면에 터보발전기가 PTG-L의 부하로 일정하게 유지되면, 여유분의 부하분담은 디젤발전기가 맡게 된다. 이와 같은 부하영역을 제어하기 위해서는 각 발전기들의 부하분담 목표는 다음과 같이 계산되어진다.
- 6) 부하영역 F : 디젤발전기의 부하율이 PL의 감소에 따라 터보발전기의 최저부하 한계치(PTG-O)와 같게 되면, 터보발전기의 최저 부하한계제어는 무시된다. 즉, 터보발전기 및 디젤발전기가 터보발전기의 정격출력인 PTG-O로 되도록 비례배분 되어진다. 여기서는 디젤발전기역전력이 유입되지 않도록 적절한 설비를 갖추어야 한다.

다. 부하변위 제어

병렬운전 시 부하변위 제어신호가 자동시동/정지 제어기능 혹은 외부에서 기인한 어느 요인에 의하여 주어지는 경우 미리 계산된 발전기의 부하는 병렬운전에 투입된 다른 발전기에 옮겨지게 된다. 이때 이들 발전기의 부하가 거의 0%로 감소하게 되면 ABC는 차단된다. 즉 부하변위제어 대상발전기의 부하가 0(KW)가 되게 된다. 만약 또 다른 발전기의 부하가 부하변위제어의 결과에 따라 한계부하 설정치를 초과하게 되면 부하변위제어 신호는 부하변위제어 동작을 하지 않게 된다.

라. 자동주파수 제어

본 제어기능은 발전기의 병렬운전을 위한 필수조건으로써 병렬운전에 투입되는 발전기의 대수와 관계없이 원동기의 가버너 모터를 제어하여 정격치로 제어되어야 한다.

마. 원동기의 가버너제어

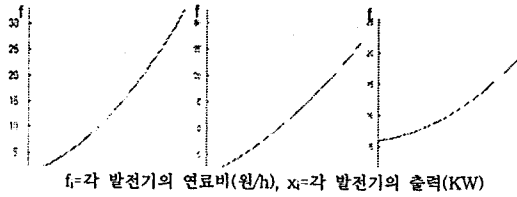
병렬운전에 투입된 각 발전기의 분담하고 있는 실제의 부하(KW)가 계측되어 목표 부하분담치와 비교 연산하여 생긴 오차분을 원동기의 가버너 모터를 통하여 보상 제어된다. 또한 모션의 주파수로 계측되어 정격주파수와

비교연산을 한 다음, 그 오차분이 “음” 혹은 “양”이냐에 따라서 펄스신호로서 오차분의 크기에 따라 제어신호의 PWM방식에 의하여 제어된다.

2.3 선내 디젤발전장치의 최적부하배분

2.3.1 라그랑제 승수법에 의한 최적부하배분

선내 발전기의 조합방법은 여러 가지가 있지만 우선 편이상 용량이 서로 다른 디젤발전기 3대로써 선내전력을 공급하는 것으로 하고 각 발전기의 출력에 대한 연료비 곡선은 일반적으로 2차 곡선으로 표시할 수 있는데, 본 연구에서는 아래와 같이 가정하여 디젤발전기의 최적 부하배분을 고려하여보았다.



f_i=각 발전기의 연료비(원/h), x_i=각 발전기의 출력(KW)

그림.3 각 발전기의 부하에 대한 연료비 곡선

발전기 각각의 부하에 대한 연료비 곡선을 나타낼 수 있을 때 각 발전기의 전기출력(KW)을 x₁, x₂, x₃라 하고, 각각 연료비(원/h)를 f₁, f₂, f₃라 할때 선내전력부하(P)를 8이라 가정하면 선내 발전기의 최적 부하배분 문제는 다음의 (1)식 조건하에서 (2)식의 F를 최소로 하는 G₁, G₂, G₃를 구하는 문제로 생각할 수 있다.

$$x_1 + x_2 + x_3 = 8 \quad \text{--- (1)} \quad F = f_1 + f_2 + f_3 \quad \text{--- (2)}$$

이 문제를 라그랑제 승수를 이용하여 정식화하면 (3)식과 같이 된다.

$$L(x_1, x_2, x_3, \lambda) = f_1 + f_2 + f_3 - \lambda(x_1 + x_2 + x_3 - 8) \quad (3)$$

(3)식을 라그랑제 함수 L을 각각의 변수로 편미분해서 최적조건을 작성하면 아래의 식과 같이 된다.

$$x_1 = \frac{\lambda - 3}{4} \quad (4), \quad x_2 = \frac{\lambda - 4}{2} \quad (5), \quad x_3 = \frac{\lambda - 1}{2} \quad (6)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0 \quad \therefore x_1 + x_2 + x_3 = 8 \quad (7)$$

위 (4),(5),(6),(7)식을 풀면 $\lambda = a$; $x_1 = 1.5, x_2 = 2.5, x_3 = 4.0$; $F_{min} = 54.25$ 를 얻을 수 있다. 여기서

$$\frac{\partial f_1}{\partial x_1} = 4x_1 + 3, \quad \frac{\partial f_2}{\partial x_2} = 2x_2 + 4, \quad \frac{\partial f_3}{\partial x_3} = 2x_3 + 1$$

는 각각의 발전기 운전출력의 증분에 대한 연료비의 증분비, 즉 증분연료비를 표시하고 있다. 일반적으로 증분연료비는 발전기 출력에 대해 단조증가로 되는데 위에서 다른 각 발전기의 증분연료비 곡선을 표시하면 그림 4와 같다.

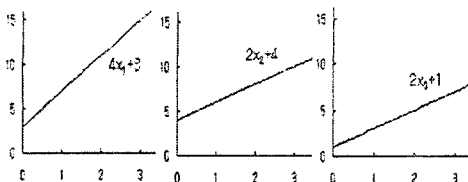


그림.4 각 발전기의 부하에 대한 증분연료비 곡선

최적조건식 (4),(5),(6)식에서 알 수 있는 바와 같이 최적 부하배분 상태에서는

$$\frac{df_1}{dx_1} = \frac{df_2}{dx_2} = \frac{df_3}{dx_3} = \lambda$$

의 관계식이 성립함을 알 수 있다.

즉, 선내발전기의 최적 부하배분을 행하기 위해서는 각 발전기의 증분 연료비를 같이 되도록 선내 전력부하(P)를 각 발전기에 배분하면 좋다는 것을 의미한다. (7)식에서 선내전력부하 8을 P로 놓고 P와 각 발전기의 출력 배분 x₁, x₂, x₃와의 관계 및 P와 증분 연료비와의 관계를 조사하면 최적조건식으로부터 다음식이 얻어진다.

$$P = x_1 + x_2 + x_3 = \frac{\lambda - 3}{4} + \frac{\lambda - 4}{2} + \frac{\lambda - 1}{2} = \frac{5\lambda - 13}{4}$$

$$\lambda = \frac{4P + 13}{5}; \quad x_1 = \frac{2P - 1}{10}, \quad x_2 = \frac{4P - 7}{10}, \quad x_3 = \frac{4P + 8}{10}$$

위의 관계식에서 P를 2에서 8까지 변화시키면서 각 발전기의 최적부하분담율의 관계를 도시하면 그림.5와 같이 된다.

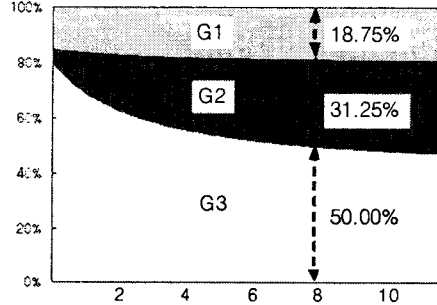


그림.5 각 발전기의 최적 부하 분담률

그림.5로부터 각 발전기의 용량제약을 고려하지 않는 경우, 각 발전기의 최적부하배분에 대해서 다음의 사항을 알 수가 있다.

- i) 연료비 곡선의 기울기가 급격한 발전기의 부하분담률이 작다. 즉, 증분연료비 곡선이 낮은 발전기가 부하분담률이 크다.
- ii) 증분연료비 곡선이 급격한 발전기는 선내 전담율의 변화가 적다.
- iii) 연료비 곡선의 상관계는 최적 부하분담시의 부하분담률에 어떠한 영향을 주지 않는다.

3. 결 론

본 논문에서는 선내 발전장치의 연료비 절감과 인건비 절감을 목적으로 발전장치의 대수 제어에 대해 알아보았다. 또한 자동분담제어의 종류에 따른 동작특성에 대하여 부하영역별로 자세히 살펴보았다. 그리고 서로 다른 용량의 3대의 디젤발전기로부터 선내전력을 공급받는 예제에 대하여 라그랑제 승수법에 의한 최적부하배분의 해를 구해보았다. 연료비 곡선과 증분연료비와 발전기의 부하분담률에 대한 상관관계에 대하여 알 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] 임용근, “마이크로프로세서를 이용한 디젤발전기의 자동부하분담을 위한 디지털 논리회로 설계 개발”, 한국기계연구소,
- [2] Teraski, “Generator Controller Technical Specification”,
- [3] Butler-Purry, K.L.; Sarma, N.D.R, “Visualization for ship board power Systems”, IEEE, HICSS’03, 8pp,2002
- [4] Karen L. Butler, “Network Reconfiguration for Service Restoration in Shipboard Power Distribution Systems”, IEEE Transaction on Power System, Vol.16, 653p 2001