

풍력-디젤 하이브리드 발전 시스템의 디젤 출력 배분 알고리즘 개발

남용윤*, 이근호⁺, 한정우⁺, 박영준⁺, 이영수⁺

(논문접수일 2011. 07. 26, 심사완료일 2011. 08. 28)

A Diesel Power Sharing Algorithm for Wind-Diesel Hybrid Electric Power Generation Systems

Yong-Youn Nam*, Geun-Ho Lee⁺, Jeong-Woo Han⁺, Young-Jun Park⁺, Young-Soo Lee⁺

Abstract

For the wind-diesel hybrid electric power generation system equipped with two diesel generators, the diesel power sharing is studied analytically and a power sharing technique of less fuel consumption is developed. Based on the technique, as example, a diesel power sharing algorithm is suggested for two diesel generators of capacity 500Kw(200Kw +300Kw).

Key Words : Wind-Diesel hybrid electric power generation system(풍력-디젤 하이브리드 발전 시스템), Diesel power sharing(디젤 출력 배분)

1. 서론

지구상에는 여전히 전기의 혜택을 누리지 못하는 지역과 중앙전력계통이 없어 디젤 발전을 채용하고 있는 지역이 많다⁽¹⁾. 이러한 지역의 경제 발전에 따라 전기 수요가 더욱 늘어날 전망이다. 중앙계통 설치에는 막대한 비용이 들기 때문에 디젤발전의 수요가 크게 증가할 것으로 예상된다.

한편, 세계적으로 추진하고 있는 이산화탄소 배출규제가 국가의 경제성장을 좌우할 정도의 중요한 이슈가 되어있다.

디젤발전의 고비용과 이산화 탄소배출 문제를 해결하기 위해 풍력발전기를 디젤발전 계통에 투입하는 것이다.

즉, 풍력-디젤 하이브리드 발전 시스템을 도입하여 연료절감과 이에 따른 이산화탄소 배출을 줄일 필요가 있다.

디젤발전을 채용하는 지역은 통상 중앙계통이 없는 원격지인

데, 원격지 독립발전 계통은 중앙계통에 비하여 매우 작은 계통이므로 부하의 변동성이 큰 특징이 있다. 본질적으로 출력 변동성이 큰 풍력발전기를 병렬로 이러한 독립발전 계통에 투입하는 풍력-디젤 하이브리드 발전 시스템은 전력 수급이 조절이 어려운 시스템이다.

독립 디젤 발전의 단점은 중앙계통에 비하여 발전단가가 높은 것인데 운영비를 낮추어 발전단가를 개선하기 위하여 하이브리드 시스템을 도입할 경우 전력수급을 제어할 수단을 준비해야 한다. 전력수급의 제어는 두 가지 시간 척도로 수행한다.

풍력발전기의 출력은 다 이용해야 하므로 디젤발전기의 출력을 조절하여 전력수급을 제어한다. 그러나 디젤발전기 제어로 감당할 범위를 벗어난 빠른 전력 변동성이 있을 경우 전력 입출력속도가 빠른 전력저장 장치를 사용하여 제어한다. Fig. 1에서 "Power Control Device"가 빠른 시간 척도의 전력수급 제

* 한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부 (yynam@kimm.re.kr)

주소: 350-343 대전광역시 유성구 장동 171번지

+ 한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부

어 장치에 해당한다. 일반적으로 풍력 투입률 20% 이하에서는 풍력의 변동성이 전력품질에 미치는 영향이 허용할 만한 수준이지만 그 이상에서는 전력품질이 크게 나빠진다.

풍력발전기를 하이브리드 발전에 투입하는 방법으로 두 가지가 있다. 항상 디젤발전기를 운전하는 방법과 풍력발전기 출력이 충분할 경우 디젤발전기를 완전히 정지시키는 방법이 있다. 첫 번째 방법의 경우 연료절약 효과가 그리 크지 않다고 보고되어 있다⁽²⁾. 두 번째 방법을 사용할 경우 디젤발전기를 시동 정지 시 계통에 과도현상이 발생할 수 있는데, 이 과도현상을 줄이기 위하여 빠른 속도의 전력수급 제어가 필요하다.

한편, 하이브리드 시스템으로 디젤발전기의 구성과 운용을 적절히 함으로써 운영비를 대폭 낮출 수 있다^(3,4). 디젤발전기 구성 즉, 디젤발전기 개수가 운영비에 큰 영향을 미친다. 원격지 부하는 피크치가 상당히 큰 특성이 있어 설비 용량이 통상 부하보다 상당히 커야 한다. Fig. 2는 자월도의 경우로 2008년 순시 출력으로 연중 최대치는 통상출력의 두 배가 넘는 데 지역 에 따라 5배가 넘는 경우도 있다.

이런 특징이 있는 독립발전 계통에 디젤발전기를 1대만 설비 하면 최대 전력에 맞추어야 하는데 위 자월도의 많은 기간을 차지하는 통상 부하에서는 발전기를 정격출력의 50%이하로

운전해야 한다. 디젤발전기는 부하가 낮을 경우 효율이 낮고 또한 엔진의 이상마모를 방지하기 위하여 대략 정격출력의 35% 이하 운전을 하지 않도록 권고되고 있다.

따라서 복수개의 디젤 발전기를 사용하는 것이 운영비 저감과 엔진 수명에 유리하므로 복수개의 디젤발전기를 사용할 경우 부하에 따라 발전기의 출력배분이 필요하고 이에 따른 배분 알고리즘이 요구된다.

2. 출력 배분 기법

2.1 출력과 연료 소비량 관계식 설정

출력과 연료 소비량의 상관관계를 설정하기 위하여 다음과 같은 가정을 적용하여 관계식을 도출할 수 있다.

- (1) 가정 1 : 디젤발전기의 효율이 100% 일 때 출력과 연료의 소비량이 비례한다.
- (2) 가정 2 : 디젤발전기의 효율은 연료소비량에 비례한다.
- (3) 가정 3 : 상수 a, b 는 엔진의 크기와 무관한 값이다.

가정 1로부터 디젤발전기의 겉보기 출력(P)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P = aF \tag{1}$$

여기서, a 는 비례상수, F 는 연료 소비량이다.

발전기의 효율은 가정으로부터, 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta = b \frac{F}{F_o} \tag{2}$$

여기서, b 는 발전기의 정격출력에서의 효율(일반적으로 최대 연료 효율), F_o 는 정격출력에서의 연료소비량이다.

디젤발전기의 출력은 식 (1)의 겉보기 출력(효율이 100%일 경우)에 식 (2)로 표현된 효율을 곱하여 얻는데 이는 출력과 연료소비량 관계로 식 (3)으로 주어진다.

$$P = \frac{ab}{F_o} F^2 \tag{3}$$

F_o 는 엔진의 크기에 따라 커지는 값이므로 식 (3)에서 $\frac{ab}{F_o}$ 은 엔진이 클수록 작은 값이다. 이는 일반적으로 특정 출력을 얻기 위하여 정격출력이 큰 발전기를 사용하면 비효율적임을 의미

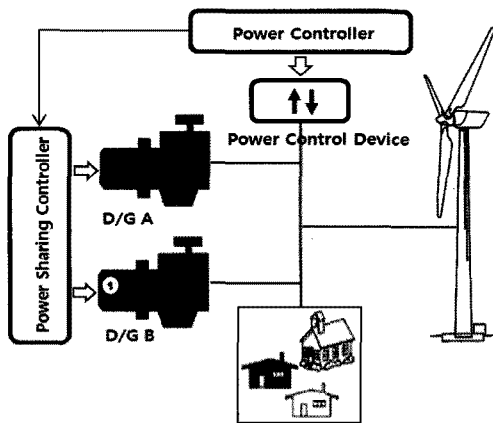


Fig. 1 Schematic of the wind-diesel hybrid electric power generation system

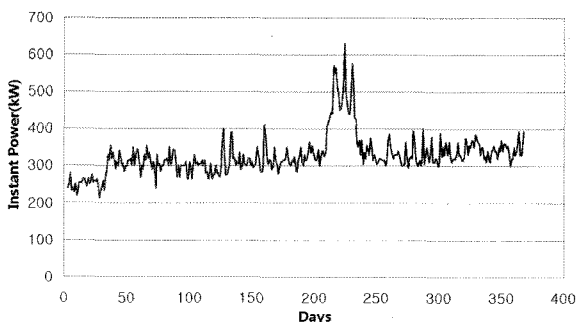


Fig. 2 Instantaneous power of jawol island in 2008

한다. 그러나 특정 출력을 얻기 위하여 한 대의 큰 발전기와 같은 정격이고 큰 발전기 정격의 1/2인 두 대의 발전기를 동일 출력으로 운전하면 연료 소비량이 동일하다. 정격 출력에서 큰 발전기의 연료 소모량을 F_o 라 하면 식 (2)로부터 작은 발전기의 정격 출력 시 연료 소모량이 $0.5F_o$ 임을 알 수 있다. 큰 발전기의 출력(P_L)과 작은 발전기 두 대의 출력(P_S)은 다시 식 (3)으로부터 다음과 같이 표현된다.

$$P_L = \frac{ab}{F_o} F_L^2, P_S = 2 \frac{2ab}{F_o} F_S^2 \quad (4)$$

동일 출력이라는 조건으로 식 (4)를 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{ab}{F_o} F_L^2 = 2 \frac{2ab}{F_o} F_S^2, F_L = 2F_S \quad (5)$$

따라서 연료 소비량에 차이가 없으며, 연료 소비량은 식 (3)으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \sqrt{\frac{F_o}{ab}} P \quad (6)$$

2.2 두 대의 발전기일 경우 출력 배분

두 대의 발전기를 a, b 로 나타내고 임의의 출력 배분을 각각 P_1, P_2 라 하면 연료 소비량 및 출력 조건은 식 (7)과 같다.

총 연료 소비량은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있으므로 여기에 출력 조건을 적용하면 식 (9)와 같이 총 연료 소비량을 정리할 수 있다.

$$F_1 = \sqrt{\frac{F_{1,0}}{ab}} P_1, F_2 = \sqrt{\frac{F_{2,0}}{ab}} P_2, P = P_1 + P_2 \quad (7)$$

$$F = \sqrt{\frac{F_{1,0}}{ab}} P_1 + \sqrt{\frac{F_{2,0}}{ab}} P_2 \quad (8)$$

$$F = \sqrt{\frac{F_{1,0}}{ab}} (P - P_2) + \sqrt{\frac{F_{2,0}}{ab}} P_2 \quad (9)$$

연료소비량의 경향을 알기 위하여 식 (9)를 P_2 에 대하여 미분하여 극점을 찾는다.

$$P_2 = \frac{F_{2,0}}{F_{1,0} + F_{2,0}} P, P_1 = \frac{F_{1,0}}{F_{1,0} + F_{2,0}} P \quad (10)$$

식 (10)의 출력 조합에서 연료소비량의 극점이 유일하게 존

재한다. 극점 근방의 연료 소비 거동을 알기 위하여 식 (9)을 두 번 미분한다.

$$F'' = -\frac{1}{4} \sqrt{\frac{F_{1,0}}{ab}} (P - P_2)^{-\frac{3}{2}} - \frac{1}{4} \sqrt{\frac{F_{2,0}}{ab}} P_2^{-\frac{3}{2}} < 0 \quad (11)$$

식 (11)로부터 식 (10)의 극점은 최대점임을 알 수 있고, 따라서 이 출력 배분에서 연료 소모량이 최대이다. 최소 연료 소모량은 출력 배분 경계에서 얻어진다. 이는 식 (9)의 총 연료 소모량이 하나의 독립변수로 표시되고 한 개의 극점을 갖기 때문에 극점을 기점으로 증가 또는 감소하는데, 여기서는 감소하는 경우로 독립변수가 취할 수 있는 최대 또는 최소 값에서 연료 소비량이 최소가 된다. 따라서 양쪽 경계(a, b 로 구분 표시)에서 연료 소모량을 비교하여 적은 쪽을 선택한다.

경계 $a : (P_a, P - P_a)$

경계 $b : (P - P_b, P_b)$ for $P > P_b$

$(0, P)$ for $P \leq P_b$

여기서, $P_a < P_b, P_a \leq P$ 이며 P_a, P_b 는 발전기 a, b 에서 가능한 최대 출력으로 통상 정격출력을 의미한다.

괄호로 표시한 출력 배분 경계는 어느 하나의 발전기 출력을 그 발전기에서 허용된 최대치로 배분하는 것을 의미한다. 예를 들면 경계 a 는 발전기 a 를 허용 최대치 출력 P_a 로 운전하고 부족한 출력을 발전기 b 로 감당하는 것을 말하며, 경계 b 는 그 반대의 경우이다.

위의 경계점을 식 (9)에 적용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{경계 } a : F^a = \sqrt{\frac{F_{1,0}}{ab}} P_a + \sqrt{\frac{F_{2,0}}{ab}} (P - P_a) \quad (12)$$

$$\text{경계 } b : \begin{cases} F^b = \sqrt{\frac{F_{1,0}}{ab}} (P - P_b) + \sqrt{\frac{F_{2,0}}{ab}} P_b, & \text{for } P > P_b \\ F^b = \sqrt{\frac{F_{2,0}}{ab}} P & \text{for } P \leq P_b \end{cases} \quad (13)$$

여기서 경계에서의 식 (14)와 같은 연료소모비가 1보다 크면 경계 a 작으면 경계 b 를 선택한다.

$$R = \frac{F^a}{F^b} \quad (14)$$

표현의 무차원화를 위하여 다음의 무차원 계수 및 변수를 도입한다.

$$\frac{F_{2,0}}{F_{1,0}} = \alpha, \quad \frac{P_a}{P} = \beta, \quad \frac{P_b}{P} = \alpha\beta$$

$$\text{단, } \left(\frac{P_b}{P_a} = \frac{abF_{2,0}}{abF_{1,0}} = \frac{F_{2,0}}{F_{1,0}} = \alpha \right), \quad (\alpha > 1, \beta \leq 1) \quad (15)$$

$P \leq P_b$ 일 때 경계의 연료소모량 비는 식 (15)로 부터 무차원화 하여 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{\sqrt{\frac{F_{1,0}}{ab} P_a} + \sqrt{\frac{F_{2,0}}{ab} (P - P_a)}}{\sqrt{\frac{F_{2,0}}{ab} P}}$$

$$= \frac{\sqrt{\beta} + \sqrt{\alpha(1-\beta)}}{\sqrt{\alpha}} \quad (16)$$

반면에 $P > P_b$ 일 때 경계의 연료소모량 비는 식 (17)과 같이 표현할 수 있다.

$$R = \frac{\sqrt{\frac{F_{1,0}}{ab} P_a} + \sqrt{\frac{F_{2,0}}{ab} (P - P_a)}}{\sqrt{\frac{F_{1,0}}{ab} (P - P_b)} + \sqrt{\frac{F_{2,0}}{ab} P_b}}$$

$$= \frac{\sqrt{\beta} + \sqrt{\alpha(1-\beta)}}{\sqrt{(1-\alpha\beta)} + \sqrt{\alpha\beta}} \quad (17)$$

이상의 결과로부터 두 대의 발전기를 사용할 경우 출력배분을 다음과 같이 수행한다. $P < P_a$ 이면 a발전기만 사용하며, $P \geq P_a$ 이면 두 발전기 출력 조합의 양쪽 경계에서의 연료 소모량을 비교하여 적은 연료소모량을 사용하는 발전기를 선택한다.

2.3 α, β 에 따른 출력 배분 경계에서의 연료 소모량비

식 (15)에 α, β 가 취할 수 있는 범위가 주어져 있으며, 여기

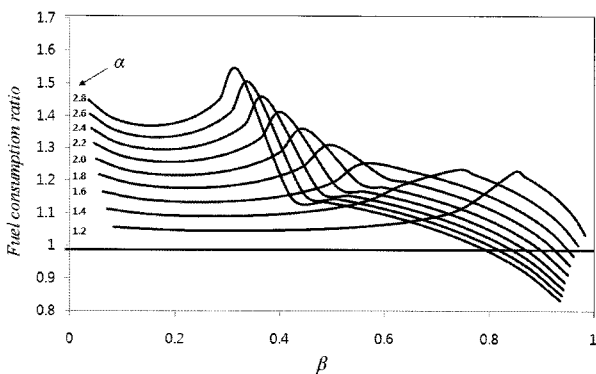


Fig. 3 Fuel consumption ratio at power sharing boundary

서는 α 의 변동 범위(1.2 ~ 2.8) 즉, 두 대의 발전기 정격출력 차이가 3배 이하의 범위에서 β 에 따른 출력배분 경계의 연료소모량 비를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 연료소모량 비가 1보다 위에 있으면 경계 a를 선택하고 1보다 작으면 경계 b를 선택한다. 화살표로 표시된 정점을 기점으로 좌측은 $P > P_b$ 일 경우이고, 우측은 $P \leq P_b$ 인 경우이다. 이 그래프는 정격 출력 비 α 가 $1 < \alpha < 1.6$ 범위에서는 모든 목표 출력에서 경계 a 출력 배분을 선택하도록 추천하고 있다.

$\alpha = 1$ 일 경우는 두 대의 발전기가 같은 출력이므로 경계의 구분은 없으나 균등하게 출력을 배분하면 식 (10)로부터 연료소모량이 최대가 된다. 이 경우의 연료 소모량은 식 (9), (10)로부터 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$F = 2\sqrt{\frac{F_{1,0}}{2ab} P} \quad (18)$$

$\alpha = 1$ 인 경우는 경계 b의 경우만 존재하므로 이 경우의 연료 소모량은 식 (13)으로 주어지는데, 경계 b의 배분과 균등 배분의 연료 소모량비는 식 (19)로부터 구해진다.

$$R = \frac{\sqrt{\frac{F_{1,0}}{ab} P_a} + \sqrt{\frac{F_{1,0}}{ab} (P - P_a)}}{2\sqrt{\frac{F_{1,0}}{2ab} P}}$$

$$= \frac{\sqrt{\beta} + \sqrt{(1-\beta)}}{\sqrt{2}} \quad (19)$$

위 연료 소모량 비를 그래프로 나타내면 Fig. 4와 같다.

$\beta = 0.5$ 의 경우는 균등 배분에 해당하므로 그 비가 1로 나타나고 있다. Fig. 4에서 균등 배분은 연료 소모량이 최대임을 알 수 있다.

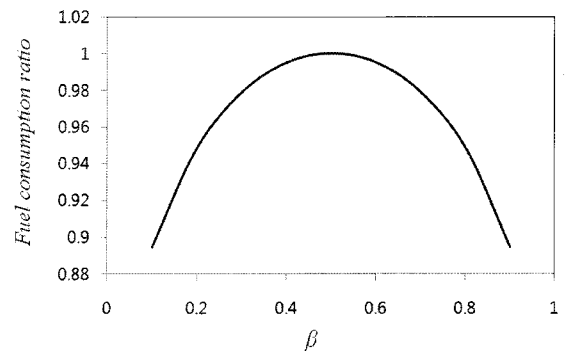


Fig. 4 Fuel consumption ratio between boundary power sharing and even sharing

3. 출력 배분 알고리즘

2장에서 도출한 배분 기법을 적용하여 출력이 각각 200kW, 300kW인 발전기에 대한 출력 배분 알고리즘을 예로써 개발한다.

출력 배분은 먼저 출력에 알맞은 발전기 조합을 결정하는 배분 구간 탐색, 그리고 출력을 배분하는 주 제어 엔진 선택으로 수행된다.

출력 배분은 발전기의 구성이 $\alpha=1.5$ 이므로 경계 δ 를 선택하면 된다. 따라서 출력 배분 시 연료 소모량 비를 구할 필요가 없어 알고리즘이 단순해진다. 그러나 다음의 상황을 고려하여 배분 알고리즘을 만들어야 한다.

- 권장 최소 출력 이상을 배분해야 함(발전기 이상 마모 방지)
- 부하의 변동으로 경계점까지 출력을 배분하지 못함(경계에서 부하변동에 대한 여유가 필요함)
- 경계점에서는 잦은 배분 구간 변경이 일어나면 디젤엔진의 시동/정지가 많이 일어날 가능성이 있고 이는 엔진의 수명을 단축시킨다. 이를 방지하기 위하여 배분 구간 탐색에 히스테리시스를 도입한다.

총 발전용량이 500kW이므로 가동 발전기 조합 3가지 경우와 최소 권장 출력에 따른 구간 1개를 더하여 총 4개의 출력 배분 구간을 Fig. 5와 같이 설정하였다. 각 출력 구간에서 구간 천이를 판단하는 출력 설정값을 (RG_l , RG_u)로 나타내었는데 첨자 l 은 하향 천이 설정값이고, 첨자 u 는 상향 천이의 경우이다. 이 천이값은 현장 계측을 통하여 조정이 필요하다. 각 배분 구간에서 마름모꼴 표시는 엔진의 거버너를 작동하는 발전기를 나타낸다.

발전기의 시동/정지를 수반하는 배분 구간 천이는 배분 구간 RG_1 과 RG_2 , RG_2 와 RG_3 사이에서 일어난다. 이 구간 사이의 상향 천이값과 하향 천이값이 다르다. 이는 잦은 구간 천이를 방지하기 위해 도입한 구간 천이 히스테리시스이다. 만일 이 두 천이값이 같다면 약간의 출력 변동으로 구간 천이가 수시

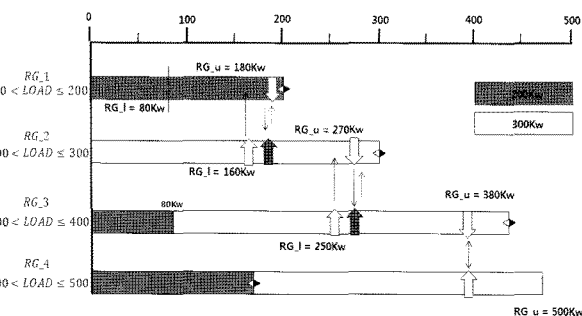


Fig. 5 Set up the power sharing ranges

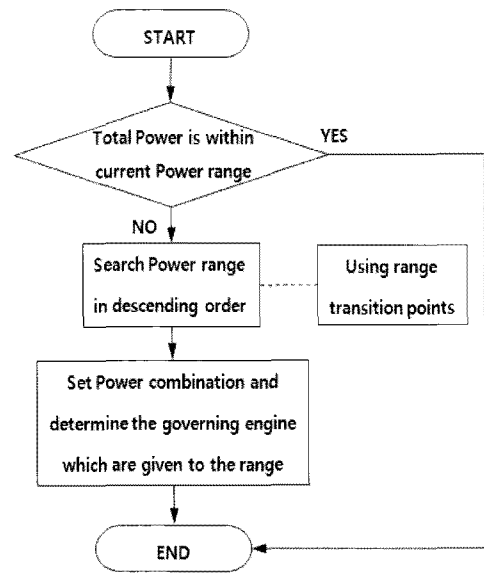


Fig. 6 Power sharing algorithm

로 일어날 가능성이 있다. 구간 RG_3 , RG_4 사이의 상,하향 천이값은 같은데 이 구간 사이에서의 천이는 엔진의 시동/정지를 수반하지 않기 때문이다.

구간 RG_3 에서는 2장에서 도출한 배분 기법을 따르지 않는데, 이는 최소 권장 출력(정격출력의 40%로 설정)을 지키기 위한 것으로 출력 요구량이 커짐에 따라 구간 RG_4 로 천이하면 경계 b 출력배분으로 운전한다. 이는 엔진 거버너 작동 발전기를 바꿈으로써 간단하게 수행된다. 구체적인 배분 알고리즘은 Fig. 6과 같다.

4. 결론

독립디젤 발전 국내의 시장을 보면 통상 200kW 내외의 평균 출력을 요구하고 있다. 따라서 피크 부하를 고려하면 500kW의 설비 용량이 필요하다. 이 논문은 이러한 시장을 겨냥한 풍력-디젤 하이브리드 발전기의 디젤발전 부하 배분 알고리즘을 개발하기 위한 기법과 이 기법에 근거하여 매우 간단한 알고리즘을 개발하였다.

두 대의 디젤 발전기를 사용하는 경우에 대한 분배 방법을 해석적으로 제시하였는데, 이를 통해 다음과 같은 결과를 도출하였으며 총 발전 용량 500kW에 배분 알고리즘 예를 제시하였다.

- (1) 두 대의 용량이 같은 발전기를 사용할 경우 출력을 동일하게 배분하는 경우가 연료 소모량 가장 많다.
- (2) 용량이 다른 두 대의 발전기를 사용할 경우 용량비 1.6 이하에서는 출력 요구량에 관계없이 큰 용량의 발전기 출력을 최대한으로 활용하는 배분이 연료 소모량이 상대적으로 적다.

- (3) 출력비가 1.6을 초과할 경우 작은 용량의 발전의 출력을 최대한으로 활용해야 연료 소모량이 상대적으로 적게 되는 출력비의 범위가 출력비가 커질수록 넓어진다. 이 경우는 출력비로서 유리한 출력 배분 경계를 선택하여 출력 배분을 해야 한다.

후 기

본 연구는 2011년도 “풍력-디젤 하이브리드 발전 시스템 설계 기술 개발”과제로 한국기계연구원 주요사업으로 지원된 연구결과입니다.

참 고 문 헌

- (1) Forsyth, T., and Baring-Gould, I., 2007, *Distributed Wind Market Application*, NREL/TP-500-39851.
- (2) DTI, 2004, *Synchronous Compensators for mini-grids and islanding*, DTI.
- (3) Ray, H., and George, E., 2005, *Wind-Diesel Systems*, Cambridge press, UK
- (4) Nacfacure, H., 2005, *Wind-Diesel and Wind Autonomous Energy Systems*, Taylor & Francis.
- (5) Manwell, J. F., McGowan, J. G., and Rogers A. L., 2006, *Wind Energy Explained*, Wiley, USA
- (6) Lee, S. P., Kang, K. W., Chang, S. M., and Lee, J. H., 2011, “Structural Design for 2kW Class Wind Turbine Blade by using Design of Experiment,” *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 20, No. 1, pp. 28~33.
- (1) Forsyth, T., and Baring-Gould, I., 2007, *Distributed*