

전력계통에 있어서 분산형 연료전지 발전시스템의 최적 도입계획에 관한 연구

論 文

50A-6-2

A Study on the Optimal Planning for Dispersed Fuel Cell Generation Systems in Power Systems

盧大錫* · 沈 憲** · 吳龍澤*** · 崔在錫[§] · 車 濬敏^{§§}

(Dae-Seok Rho · Hun Shim · Yong-Taek Oh · Jae-Seok Choi · Jun-Min Cha)

Abstract - Recently, the operation of power systems has become more difficult because the peak demand load is increasing continuously and the daily load factor is getting worse and worse. Also, the consideration of deregulation and global environment in electric power industry is required. In order to overcome those problems, a study on the planning and operation in power systems of dispersed generating sources such as fuel cell systems, photovoltaic systems and wind power systems, has been performed energetically. This paper presents a method for determining an optimal operation strategy of dispersed co-generating sources, especially fuel cell generation systems, considering thermal supply as well as electric power supply. In other words, the optimal operation of those sources can be determined easily by the principle of equal incremental fuel cost and the thermal merit of those sources can be also evaluated quantitatively through Kuhn-Tucker's optimal conditions. In additions, an priority method using the comparison of total cost at the peak load time interval is presented in order to select the optimal locations of those sources. The validity of the proposed algorithms is demonstrated using a model system.

Key Words : Dispersed Co-generating Sources, Power Systems, Optimal Operation Strategy, Fuel Cell Systems

1. 서 론

최근, 국내의 발전설비 용량은 4,426만kW('99년 6월)이고, 장기전원 개발계획에 의하면 2015년에는 약 7,900만kW로 증가될 것으로 예상되고 있다. 이러한 발전설비 용량증가의 대부분은 화석 연료를 사용하는 발전설비로 2015년에는 이들이 차지하는 비율은 약 60%정도가 될 것으로 예상되고 있다.^[1] 그러나, 이러한 전력수요의 증가는 에너지 수급을 위한 화석연료의 확보라는 근원적인 문제뿐만 아니라, 전력산업이 현재 안고있는 여러 문제점들 즉, 부하율의 악화로 인한 설비 이용률의 저하, 대용량 전원의 원격화·편제화, 지구규모적인 환경 문제 등이 커다란 장애요인으로 대두되고 있는 실정이다. 따라서, 이러한 문제점들을 극복하기 위한 하나의 대안으로 신 에너지 전원(연료전지, 태양광, 풍력, 소형열병합, 2차전지 등)의 개발과 이들 전원의 전력계통에의 최적운용에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다.^{[1]-[10]}

이러한 배경 하에서, 연료전지는 다양한 연료를 사용할 수 있고, 저공해 특성을 가지고 있으며, 부하가 밀집된 도시 및 배전용변전소 등에 분산배치가 가능하여 송전손실의 저감을 꾀할 수 있고, 또한 운전 중에 발생하는 폐열을 이용한 열병

합 운전이 가능하며, 가장 효과적인 차세대 에너지 전원의 하나로 기대되고 있다. 그러나, 분산형 전원인 연료전지는 다수가 분산 배치되는 속성을 가지고 있으므로, 무질서하게 도입·운용되는 경우, 기존의 전력계통 설비의 운용과 계획에도 장애를 끼쳐, 계통 전체의 경제성 및 에너지 절약효과를 손상시킬 염려가 있다. 따라서, 연료전지의 보급을 위한 필수적인 경제성 확보와 효율적인 전력계통을 구성하기 위해서는 계획 단계부터의 최적 배치 및 운용에 관한 검토와 부가적인 열에너지를 활용하는 것이 중요한 과제가 된다. 한편, 전기사업자뿐만 아니라 민간부문에서도 대규모 열병합 발전소의 도입이 예상되어, 설치 지점인 수용가만이 아닌 계통측면에서도 경제성을 고려해야 하므로, 전력과 열 공급에 대한 종합적인 에너지 유효이용 측면에서의 글로벌한 운용 지침이 요구된다.

따라서, 본 논문에서는 연료전지의 폐열에 대한 메리트를 정량적으로 평가하는 수법을 제안하여, 먼저 연료전지의 전기에너지만을 고려한 경우와 전기와 열에너지를 동시에 고려한 종합적인 최적 도입계획 알고리즘을 제안하였다. 구체적으로는 연료전지의 최적 도입모션을 결정하기 위하여, 피크시간대의 총 비용을 계산하여 나열하고, 배치효과가 적은 후보 모션을 제외하는 우선순위법을 제안하여, 패널티 계수를 이용한 기존의 알고리즘^{[8],[9]}과 비교·평가하였다. 또한, Kuhn-Tucker의 최적 조건식을 이용하여 연료전지의 최적 출력식과 열적 메리트를 정량적으로 평가하는 열등가 환산 계수를 유도하였으며, 이에 근거하여 전력 공급에 의한 메리트뿐만 아니라, 열적 메리트도 고려한 연료전지의 최적운용 알고리즘을 제안하였다. 끝으로, 모델 전력계통과 연료전지

* 正 會 員 : 韓 國 技 術 大 工 大 電 氣 工 學 科 助 教 授 · 工 博

** 正 會 員 : (주) 에스에너지 研 究 員 · 碩 士

*** 正 會 員 : 韓 國 技 術 大 工 大 電 氣 工 學 科 副 教 授 · 工 博

§ 正 會 員 : 慶 尙 大 工 大 電 氣 電 子 工 學 部 副 教 授 · 工 博

§§ 正 會 員 : 大 真 大 工 大 電 氣 工 學 科 助 教 授 · 工 博

接 受 日 字 : 2000年 12月 15日

最 終 完 了 : 2001年 5月 22日

를 대상으로 시뮬레이션을 수행하여, 제안한 알고리즘의 유용성을 확인하였다.

2. 전력공급면에서 연료전지의 최적 도입계획

2.1 최적 운용문제의 정식화

연료전지의 최적운용도 기존의 화력발전기와 같이, 전력계통의 연간 총 비용의 최소화 문제로서 정식화할 수 있다. 즉, 각 발전기의 발전 비용 및 연료전지의 운전비용에 대한 총합으로 다음 식과 같이 정식화할 수 있다.

$$Min F = \sum_{i=1}^{NG} f_{gi}(P_{gi}) + \sum_{j=1}^{NC} f_{cj}(P_{cj}) \quad (1)$$

Subj. to

$$P_D + P_L - \sum_{i=1}^{NG} P_{gi} - \sum_{j=1}^{NC} P_{cj} = 0 \quad (2)$$

$$P_{gimin} \leq P_{gi} \leq P_{gimax} \quad (3)$$

$$P_{cjmin} \leq P_{cj} \leq P_{cjmax} \quad (4)$$

여기서,

$f_{gi}(P_{gi})$: i번째 화력발전기의 비용 함수

$f_{cj}(P_{cj})$: j번째 연료전지의 비용 함수

P_{gi} : i번째 화력발전기의 출력

P_{cj} : j번째 연료전지의 출력

NG, NC : 화력발전기 대수와 연료전지 대수

P_D : 피크부하

P_{gimax}, P_{gimin} : i번째 화력발전기 출력의 상·하한치

P_{cjmax}, P_{cjmin} : j번째 연료전지 출력의 상·하한치

상기의 식 (2)는 전력수급 평형조건이며, 식 (3)과 식 (4)는 각 화력발전기와 연료전지의 출력에 대한 상·하한 제약 조건을 나타낸다.

2.2 Kuhn-Tucker정리에 기초한 최적 운용조건

상기의 수급 조건하에서 총 운전비용을 최소로 하는 최적화 문제를 구하기 위하여, 여기서는 다음 식과 같이 라그랑주 함수를 도입하여 확대 목적함수(L)를 구성한다.

$$L = \sum_{i=1}^{NG} f_{gi}(P_{gi}) + \sum_{j=1}^{NC} f_{cj}(P_{cj}) + \lambda(P_D + P_L - \sum_{i=1}^{NG} P_{gi} - \sum_{j=1}^{NC} P_{cj}) \quad (5)$$

상기의 함수 L에 대하여, Kuhn-Tucker의 최적 조건(Optimal Conditions)을 적용하면, 최적 해는 다음과 같이 구해진다.

$$\lambda \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{gi}}\right) = \frac{df_{gi}}{dP_{gi}} \quad (6)$$

$$\lambda \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{cj}}\right) = \frac{df_{cj}}{dP_{cj}} \quad (7)$$

또한, 상기의 식은 발전기 모선과 연료전지 설치모선의 패널티 계수 L_{gi}, L_{cj} 를 각각 도입하면, 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda = \frac{df_{gi}}{dP_{gi}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{gi}}} = \frac{df_{gi}}{dP_{gi}} \cdot L_{gi} \quad (8)$$

$$\lambda = \frac{df_{cj}}{dP_{cj}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{cj}}} = \frac{df_{cj}}{dP_{cj}} \cdot L_{cj} \quad (9)$$

2.3 최적운용 결정알고리즘

연료전지는 현재 개발중인 시스템으로 그 전기적인 출력과 비용 특성이 아직 확정된 것이 없다. 따라서, 화력발전기의 연료비 특성과 마찬가지로 연료전지의 등가적인 연료비 특성도 다음 식과 같이 출력의 이차함수로 가정한다.

$$f_{gi}(P_{gi}) = a_i P_{gi}^2 + b_i P_{gi} + c_i \quad (10)$$

$$f_{cj}(P_{cj}) = (a_j P_{cj}^2 + b_j P_{cj} + c_j) \times FKG \quad (11)$$

여기서, $a_i \sim c_i$ 와 $a_j \sim c_j$ 는 화력발전기와 연료전지의 특성을 나타내는 비용계수이며, FKG 는 다양한 연료를 사용하는 연료전지의 비용계수를 화력발전기와 동일한 차원으로 나타내기 위하여 곱해주는 등가 계수로서, 연료전지의 연료비를 나타내며, 단위는 원/kg이다. 식 (8)과 식 (10)에 의하여 화력발전기 i에 대한 최적 출력배분은 식 (12)와 같이 결정되며, 식 (9)와 식 (11)에 의하여 임의의 연료전지 j에 대한 최적 출력배분은 식 (13)과 같이 결정된다.

$$P_{gi} = \frac{1}{2a_i} \left\{ \lambda \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{gi}}\right) - b_i \right\} \quad (12)$$

$$P_{cj} = \frac{1}{2a_j} \left\{ \lambda \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{cj}}\right) - b_j \right\} \quad (13)$$

상기의 식으로부터, λ 및 증분 송전손실($\partial P_L / \partial P_{cj}$)의 값을 적절하게 결정함으로써, 가장 경제적인 화력발전기와 연료전지의 출력 배분을 구할 수가 있다. 이상에서 언급한 등 λ 법에 의한 연료전지의 최적운용 알고리즘은 그림 1과 같다.

2.4 연료전지의 최적 배치점 선정

(1) 최적 배치점 선정

일반적으로 연료전지는 수용가에 가까운 배전계통에 도입·운용되는 것이 예상되는데, 이 경우 부하율의 개선과 신뢰도 향상, 예비전원 등, 용도에 따라 최적의 운용방안이 서로 다를 수 있다. 그러나, 연료전지의 도입배치 결정문제는 다른 모든 계통설비의 도입계획을 확정된 것으로 가정하면, 화력발전기와 연료전지의 총 비용에 대한 최소화 문제로 정식화할 수 있다. 즉, 어느 시간대에 있어서 각 발전기의 부하 분담은 등증분 법칙(등 λ 법)에 의하여 경제적으로

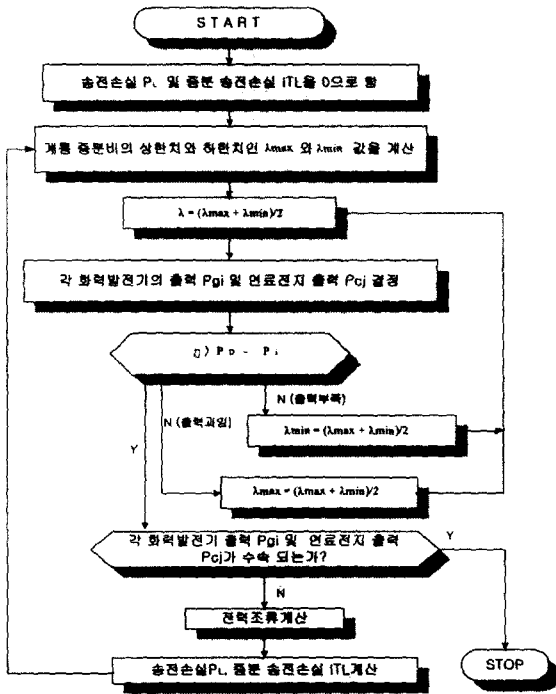


그림 1. 등 λ법에 의한 연료전지의 최적운용 알고리즘
 Fig. 1 Optimal Operation Algorithm Using Equal λ Method

배분되어 지므로, 발전기 모선에서의 중분 송전손실을 일정하다고 가정하면, 도입에 따른 총 비용의 최소화 문제는 총 발전량을 최소로 하는 것, 즉 송전손실을 최소로 하는 문제가 된다. 이것을 단순하게 생각하면, 연료전지 1대를 전체의 모선에 각각 배치시킨 경우를 상정하여, 전체 시간대에 걸쳐 총 비용을 산정·비교하여 가장 경제적인 모선을 결정하면 된다. 그러나, 실 계통에서는 배치점의 대상이 되는 후보 모선이 많고, 계산시간대도 막대하기 때문에, 전체 모선에 배치하여 최적의 배치점을 선정한다는 것은 거의 불가능한 문제가 된다. 따라서, 본 논문에서는 다음 절에서 언급하는 우선순위 결정법을 이용하여, 계산 부담을 경감시키는 알고리즘을 제안한다.

(2) 우선순위 결정법

여기서는 기존의 전력계통에 연료전지를 도입하는 경우, 화력발전기의 연료비 경감을 정량적으로 고려하여 계통 전체의 경제성을 평가한다는 관점에서 연료전지의 최적 배치점을 선정하고자 한다. 그러나, 앞 절에서 언급한 바와 같이 최적 배치점을 결정하기 위해서는 연료전지를 전 지점에 배치한 경우를 상정하여 총 비용을 계산하지 않으면 안 된다. 그러나, 실계통의 배치 후보모선은 일반적으로 상당히 큰 값을 가지므로, 전체 시간대에 대하여 모든 후보모선의 총 비용을 계산한다는 것은 현실적으로 불가능하다.

따라서, 본 논문에서는 각 부하단(모선 또는 배전용변전소)에 연료전지가 도입되는 경우, 피크부하 시간대에서 연료전지가 앞 절(그림 1)에서 결정된 최적운용에 의하여 운전되는 것을 상정하여 경제적인 효과가 큰 모선, 즉 전체 비용

이 작은 것을 순서대로 나열하고, 이 우선순위에 기준하여 도입 효과가 확실하게 적은 모선들을 검토 대상에서 제외시키는 선택 알고리즘을 이용한다. 실제의 최적 배치점은 이 결정방법에 의하여 선택된 일정 수의 후보 모선들에 대하여, 전체 부하시간대(년간 8,760시간)에 대한 상세한 총 비용을 계산하여 가장 효과가 큰 모선을 최적 배치점으로 결정한다. 따라서, 실 규모 계통에서도 최적 배치점을 적은 계산부담으로 결정하는 것이 가능하게 된다. 이상의 최적 배치점 결정알고리즘은 그림 2와 같다.

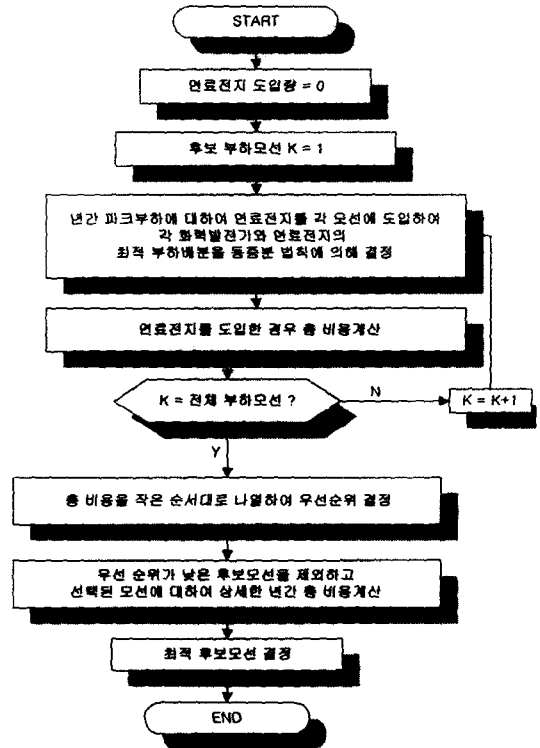


그림 2. 우선순위법에 의한 연료전지의 도입결정 알고리즘
 Fig. 2 Optimal Planning Algorithm by Priority Method

3. 열병합을 고려한 연료전지의 최적 도입계획

3.1 열병합을 고려한 최적 운용 알고리즘

(1) 최적 운용문제의 정식화

연료전지 발전시스템을 대상으로 하는 경우, 열병합의 가치를 어떠한 형태로든 평가하지 않으면 안 된다. 따라서, 본 절에서는 연료전지의 열 공급을 고려한 총 비용의 최소화 문제로서 정식화한다. 즉, 전 절의 식 (1)에서와 같이 전력 공급만 고려한 운전비용과 열 부하에 대한 보일러의 운전비용의 총합의 최소화 문제로 나타낼 수 있다. 여기서, 보일러는 열병합 시스템을 구성한다는 목적에서 연료전지의 열 출력으로 공급하지 못하는 열 부하를 보충하는 역할을 수행한

다. 이상의 최적화 문제는 다음 식과 같이 정식화시킬 수 있다.

$$Min F = \sum_{i=1}^{NG} f_{gi}(P_{gi}) + \sum_{j=1}^{NG} f_{cj}(P_{cj}) + \sum_{j=1}^{NG} f_{Bj}(H_{Bj}) \quad (14)$$

Subj.to

$$P_D + P_L - \sum_{i=1}^{NG} P_{gi} - \sum_{j=1}^{NG} P_{cj} = 0 \quad (15)$$

$$P_{gimin} \leq P_{gi} \leq P_{gimax} \quad (16)$$

$$P_{cjmin} \leq P_{cj} \leq P_{cjmax} \quad (17)$$

$$H_{Dj} \leq H_{cj} + H_{Bj} \quad (18)$$

$$H_{Bj} \geq 0 \quad (19)$$

여기서,

H_{Dj} : j번째 모선의 열 수요

H_{cj} : j번째 연료전지의 열 출력

f_{Bj}, H_{Bj} : j번째 보일러의 연료비와 열 출력

식 (15)는 전력수급 평형조건이며, 식 (16)과 식 (17)은 화력발전기와 연료전지의 출력에 대한 상·하한 제약조건을 나타낸 것이다. 또한, 식 (18)은 열 공급 제약조건이며, 식 (19)는 보일러의 열 출력 제약조건이다.

(2) 최적 운용조건인 확장

상기의 식 (14)는 수급 조건하에서 총 비용을 최소화 하는 문제로 정식화할 수 있는 데, 전 절과 마찬가지로 라그랑주 함수를 도입하여, 다음 식과 같이 확대목적 함수를 구성한다.

$$L = \sum_{i=1}^{NG} f_{gi}(P_{gi}) + \sum_{j=1}^{NG} f_{cj}(P_{cj}) + \sum_{j=1}^{NG} f_{Bj}(H_{Bj}) + \lambda(P_D + P_L - \sum_{i=1}^{NG} P_{gi} - \sum_{j=1}^{NG} P_{cj}) + \mu_j(-H_{cj} - H_{Bj} + H_{Dj}) \quad (20)$$

상기의 확대 목적함수 L에 대하여, 앞 절에서와 마찬가지로 Kuhn-Tucker의 최적 조건을 적용하면, 최적 해는 다음과 같이 구해진다.

$$\lambda \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{gi}}\right) = \frac{df_{gi}}{dP_{gi}} \quad (21)$$

$$\lambda \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{cj}}\right) = \frac{df_{cj}}{dP_{cj}} - \mu_j \times \frac{dH_{cj}}{dP_{cj}} = \frac{d}{dP_{cj}}(f_{cj} - \mu_j \times H_{cj}) \quad (22)$$

$$\frac{\partial L}{\partial H_{Bj}} = \frac{df_{Bj}}{dH_{Bj}} - \mu_j \geq 0 \quad (23)$$

$$\left(\frac{df_{Bj}}{dH_{Bj}} - \mu_j\right) \times H_{Bj} = 0 \quad (24)$$

$$\mu_j \geq 0, H_{Bj} \geq 0 \quad (25)$$

식 (21)의 f_{gi} 와 식 (22)의 $(f_{cj} - \mu_j \times H_{cj})$ 가 동일한

단위 (원/h)를 가지게 되므로, 전력에 대한 비용이라는 차원에서 식 (22)의 괄호안을 "열 등가 환산비용"이라고 할 수 있다. 열 등가 환산비용은 전력발생 비용을 의미하는 1항으로부터 2항의 열적 메리트를 감산하는 형태로 구성된다. 또한, $\mu_j \cdot H_{cj}$ 의 단위가 (원/h)이므로, μ_j 의 단위는 (원/Mcal·h)임을 알 수 있다. μ_j 는 연료전지의 각 운용상태에 있어서 배열의 가치를 나타내고 있으므로, 이 계수를 "열 등가 환산계수"라고 부르기로 한다. 또한, 식 (23)과 식 (25)으로부터 μ_j 의 값은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$0 \leq \mu_j \leq \frac{df_{Bj}}{dH_{Bj}} (= a_j \text{로 함}) \quad (26)$$

식 (26)으로부터 열 등가 환산계수인 μ_j 의 상·하한치를 구할 수 있으며, 이 조건을 만족해야만 연료전지가 열적 메리트를 가질 수 있음을 알 수 있다.

(3) 최적 운용결정 알고리즘

연료전지는 전기적 출력에 따른 폐열을 발생하지만, 이러한 관계는 아직 정의된바 없으므로, 여기서는 문제의 간략화를 위하여, 연료전지의 전기적인 출력과 열 출력이 다음 식과 같이 선형관계가 성립한다고 가정한다.

$$H_{cj} = d_j P_{cj} + e_j \quad (d_j, e_j \text{는 정수}) \quad (27)$$

식 (10)과 식 (21)에 의하여, 임의의 화력 발전기 i에 대한 출력은 식 (28)과 같이 결정되며, 식 (11)과 식 (22)에 의하여 임의의 연료전지 j에 대한 출력은 식 (29)와 같이 결정된다.

$$P_{gi} = \frac{1}{2a_i} \left\{ \lambda \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{gi}}\right) - b_i \right\} \quad (28)$$

$$P_{cj} = \frac{d_j}{2a_j} \mu_j + \frac{1}{2a_j} \left\{ \lambda \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{cj}}\right) - b_j \right\} \quad (29)$$

따라서, 식 (27)과 식 (29)으로부터 다음 식이 구해진다.

$$H_{cj} = \frac{d_j^2}{2a_j} \mu_j + \frac{d_j}{2a_j} \left\{ \lambda \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{cj}}\right) - b_j + \frac{2a_j e_j}{d_j} \right\} \quad (30)$$

이 식에서, λ 및 증분 송전손실($\partial P_L / \partial P_{cj}$)의 값이 주어진다면, 열 출력 H_{cj} 와 열 등가 환산계수 μ_j 는 그림 3과 같이 선형관계가 있음을 알 수 있다. 여기서, μ_j 는 전 절에서 언급한 바와 같이 식 (26)을 만족해야 하므로, 그림 3에서 μ_j 의 값은 상·하한치가 존재함을 알 수 있다. 따라서, 연료전지의 열 출력과 열 등가 환산계수는 반드시 그림 3의 굵은 직선상에 있다고 할 수 있다. 그림 3과 같이, 열 부하는 3가지의 형태로 분류할 수 있으며, 이 3종류의 부하와 μ_j 값의 물리적 의미는 다음과 같이 3개의 최적 운용상태로서 설명할 수 있다.

① 연료전지의 열 출력이 열 수요보다 큰 경우

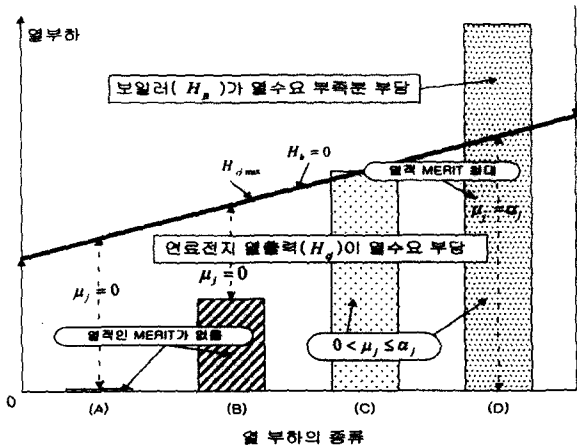


그림 3. 열 출력(열 부하)과 열 등가 환산계수의 관계
Fig. 3 Thermal Output and Thermal Equivalent Index

연료전지의 열 출력이 열 수요를 초과하여 운전하는 경우는 그림 3의 (A)와 (B)에 해당된다. 즉, 연료전지의 열 출력이 열 부하보다 큰 경우로서 보일러는 운전되지 않고 ($H_{Bi} = 0$) 열 등가 환산계수 μ_j 의 값은 0이 되어, 열적 메리트가 없게 되는 상태가 된다. 이 경우는 열 수요가 작음에도 불구하고 연료전지가 그 이상의 열 출력 상태에서 운전되므로, 열병합에 의한 메리트를 무시한 상태로 생각할 수 있다. 즉, 이 경우는 식 (22)에서 열 등가 환산계수 μ_j 의 값이 0으로 되기 때문에, 연료전지의 증분 연료비는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{df_{Gj}}{dP_{Gj}} = \lambda \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{Gj}} \right) \quad (31)$$

따라서, 연료전지의 출력도 각 화력 발전기와 마찬가지로 기존의 등 λ 법칙에 의하여 결정되어 진다.

② 연료전지의 열 출력이 열 수요와 일치하는 경우

연료전지의 열 출력이 열 수요와 일치하는 경우에는 연료전지의 열 출력을 열 부하에 일치하도록 운전하면 된다. 이것은 그림 3의 (C)에 해당되며, μ_j 의 값은 $0 < \mu_j < \alpha_j$ 의 범위에 있다는 것을 알 수 있다. 이때, 보일러는 운전되지 않고 ($H_{Bi} = 0$), 연료전지만으로 열 수요를 공급하게 된다. 각 화력 발전기와 연료전지의 전기적 출력은 식 (21)과 식 (22)의 등 λ 법칙에 따라 산출되지만, 열 등가 환산계수 μ_j 는 식 (26)을 제약 조건으로 하여 식 (30)을 변형시키면, 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu_j = \frac{2 a_j}{d_j^2} \left[H_{Gj} - \frac{d_j}{2 a_j} \left(\lambda \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{Gj}} \right) - b_j + \frac{2 a_j e_j}{d_j} \right) \right] \quad (32)$$

연료전지의 증분연료비는 식 (22)의 우변과 같이 열 등가 환산계수를 포함한 형태로 나타내어지며, 연료전지의 출력은

이 수정 증분연료비를 이용하여 화력 발전기와 함께 등 λ 법칙에 의하여 결정되어 진다.

③ 연료전지의 열 출력이 열 수요보다 작은 경우

이 경우는 그림 3의 (D)에 해당되며, 특성 직선보다 위에 있는 것으로서, 연료전지는 이 열 부하를 모두 공급할 수 없게 된다. 즉, 연료전지의 열 출력만으로는 부족하므로 그 부족분을 보일러가 부담해야 한다. 따라서, 연료전지의 열 출력과 보일러가 부족분의 열 수요를 공급하는 운용상태 ($H_{Bi} > 0$)가 되며, 이 경우 최적 운용 해의 조건은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{df_{Gj}}{dP_{Gj}} - \mu_j \times \frac{dH_{Gj}}{dP_{Gj}} = \lambda \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{Gj}} \right) \quad (33)$$

$$\mu_j = \frac{df_{Bj}}{dH_{Bj}} \quad (34)$$

$$H_{Dj} - H_{Gj}(P_{Gj}) - H_{Bj} = 0 \quad (35)$$

식 (26)과 식 (34)으로부터, 열 등가 환산계수 μ_j 의 값은 열적 메리트가 최대가 되는 상태인 최대치 α_j 를 취하고 있음을 알 수 있고, 이는 식 (32)에 의해서 구할 수 있다. 또한, 이 경우는 $H_{Bi} > 0$ 및 식 (35)으로부터, 연료전지의 열 출력이 열 수요보다 작게 됨을 알 수 있다. 한편, 연료전지의 증분 연료비는 전 질의 열 출력이 열 수요와 일치하는 경우와 마찬가지로, 식 (22)와 같이 나타내어지고, 다만 μ_j 의 값이 최대인 상태가 된다. 연료전지의 출력은 이 수정 증분 연료비를 이용하여, 화력발전기와 함께 등 λ 법칙에 의하여 결정되어진다.

이상의 세 가지 경우로 분류된 열 출력 H_{Gj} 와 μ_j 의 관계를 나타내는 그림 3을 이용하여, 주어진 열 수요에 대응하는 열 등가 환산계수 μ_j 를 일의적으로 산출할 수 있다. μ_j 의 값이 결정되면, 등 λ 법과 동일한 절차를 거쳐 연료전지의 최적 운용패턴을 산출할 수 있다. 즉, 전력 공급만 상정한 그림 1의 등 λ 법에 근거하여 열에너지도 고려할 수 있도록 그림 4와 같이 확장한 것이다(이것을 "확장 등 λ 법"이라고 함). 이 그림의 확장 등 λ 법에 의한 최적운용 알고리즘을 전 질의 등 λ 법에 기초한 화력 발전기의 최적운용 결정알고리즘과 동일한 흐름으로 계산을 수행하지만, 다른 점은 그림 4의 * 부분의 블록이 추가되어진 것이다. 즉, 연료전지의 열 출력의 가치를 나타내기 위하여, 종래의 등 λ 법에는 없었던 열 등가 환산계수 μ_j 를 고려함으로써, 전기와 열의 공급에 대응시킨 점이 제안한 알고리즘의 특징이다.

3.2 열병합을 고려한 최적배치점 결정 수법

열병합을 고려한 최적 도입계획 결정 알고리즘도 그림 2의 전력 공급만 고려했던 알고리즘과 같이, 경제 부하배분에 의하여 총 비용을 산정·비교하여 비용이 최소인 모션을 결

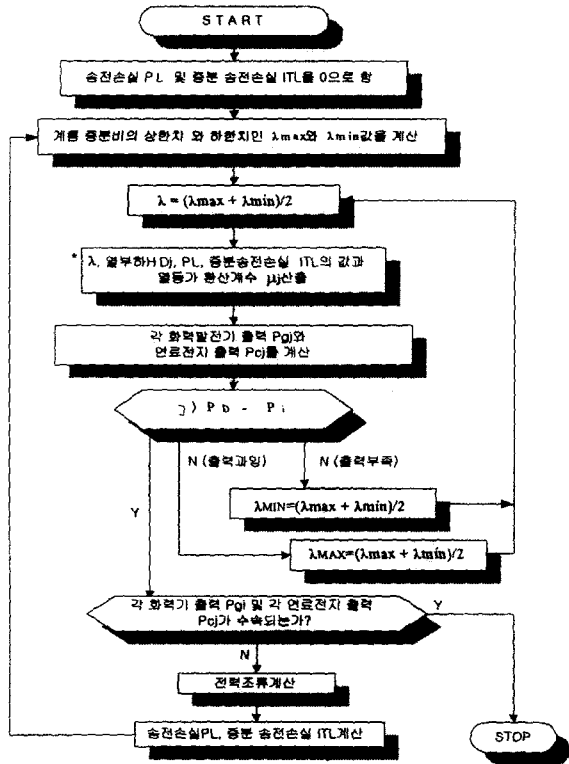


그림 4. 확장 등 λ법에 의한 최적운영 결정알고리즘
Fig. 4 Optimal Operation Algorithm Using Expanded Equal λ Method

정하면 된다. 하지만, 열 부하의 측면을 살펴보면, 연료전지의 도입 전에는 보일러가 각 부하에 개별 열 수요를 담당하는데, 연료전지가 후보 모선에 도입되면 해당 모선만의 열 부하를 감당하게 되므로, 후보 모선에 연료전지를 도입했을 때 각 모선의 보일러의 형태나 부하량 등이 다를 수 있기 때문에 총 비용을 평가하기 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 전기적인 측면에서 총 비용이 최소로 되는 값(전력 평가지수)과 열적인 측면에서 운용 비용의 감소 폭이 최대가 되는 값(열적 평가지수)의 총합(총 평가지수)이 최대가 되는 모선을 연료전지의 후보모선으로 결정하면 된다. 이들 지수들은 다음절에서 상세하게 정의한다. 이것은 전력 공급만을 고려한 그림 2의 연료전지의 도입 알고리즘에서 확장된 개념으로 그림 5와 같이 나타낼 수 있다.

3.3 평가지수의 정의

연료전지의 전기와 열 공급에 대한 메리트를 정량적으로 평가하기 위하여, 다음 식과 같이 도입 전·후의 메리트를 나타내는 평가지수를 정의한다. 여기서, 평가지수는 전력 공급면의 메리트를 나타내는 식 (36)과 보일러 연료비 절약에 의한 열적 메리트를 나타내는 식 (37)의 2가지로 나누고, 또한 두 평가지수는 동일한 차원(%)이므로 대수적으로 합한 식 (38)을 총 평가지수로 정의한다.

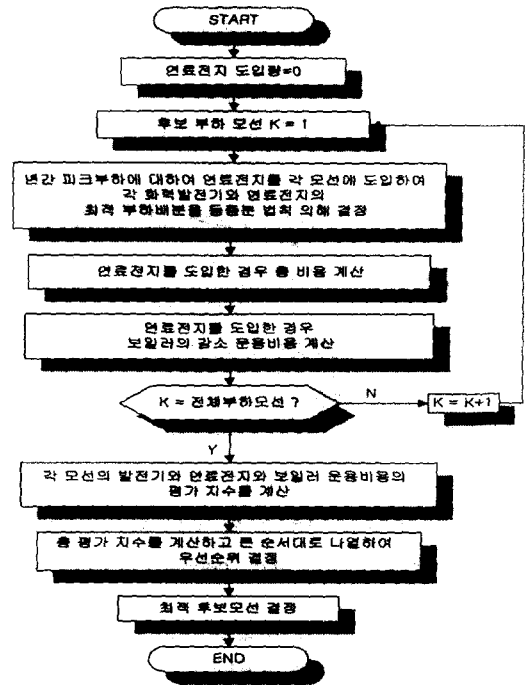


그림 5. 연료전지의 최적도입 알고리즘
Fig. 5 Optimal Planning Algorithm of Fuel Cell System

전력 평가지수 (%) =
$$\frac{\text{연료전지 도입전 총비용} - \text{연료전지 도입후 총비용}}{\text{연료전지 도입전 총비용}} \times 100 \quad (36)$$

열 평가지수 (%) =
$$\frac{\text{연료전지 도입후 보일러 절약비용}}{\text{연료전지 도입전 보일러 총비용}} \times 100 \quad (37)$$

총 평가지수 (%) = 전력 평가지수 + 열 평가지수 (38)

따라서, 총 평가지수가 가장 큰 지점(부하 모선 또는 배전 용변전소)이 경제적인 효과가 가장 크게 되므로, 연료전지의 후보 배치점으로 선정된다.

4. 모델 계통에의 적용

4.1 모델계통 데이터 및 시뮬레이션 조건

본 연구에서 제안한 알고리즘의 유용성을 확인하기 위하여 다음과 같은 모델 계통과 시뮬레이션 조건을 상정하였다.

① 모델 계통은 그림 6과 같이 4기 8모선 계통을 사용하였으며, 여기서 5번, 6번, 7번, 8번 모선은 각각 주택지역, 상업지역, 공장지역, 혼재지역으로 가정하였다. 또한, 1번 모선은 슬랙 모선이고, 2-4번 모선은 발전기 모선이다.

② 각 화력발전기와 연료전지, 보일러의 특성 데이터는 표 1과 표 2와 같은 데, 이것은 참고문헌 [8] - [10]의 데이터를 활용한 것이다. 여기서, 연료전지의 단위 용량은 100kW로서

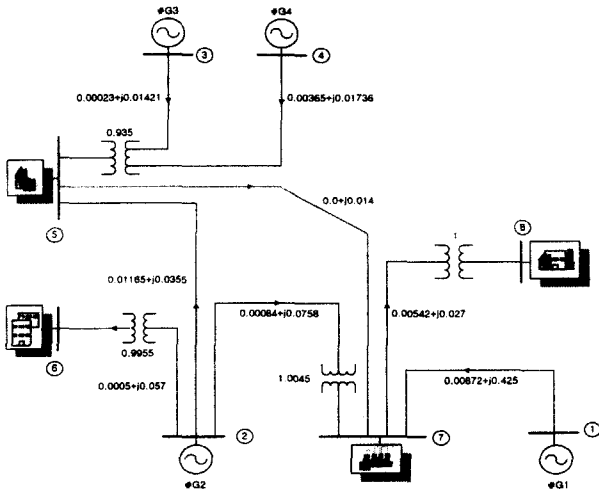


그림 6. 4기 8모선 모델 계통^{[2],[11]}

Fig. 6 Model Power Systems (4 Generators and 8 Buses)

표 1. 각 발전기와 연료전지의 데이터^{[8]-[10]}

Table 1 Data of Each Generator and Fuel Cell System

모선 조건	모선 번호	Pmax (pu)	Pmin (pu)	a	b	c
발전단	1	1.25	1.45	1.09374	7168.85	116669.7
	2	6.0	0.9	1.22541	3726.23	269743.6
	3	3.5	0.4	0.97677	5624.56	233780.5
	4	3.5	0.3	1.45808	5396.15	245921.1
연료전지	0.001	0.00025	3000.0	45.0	17.465	

표 2. 연료전지와 보일러의 데이터^{[8]-[10]}

Table 2 Data for Fuel Cell and Boiler System

연료전지	연료비	300원/kg
	전기출력과 열출력의 에너지 비	$H_c / P_c = 1$
보일러	연료비	100원/Mcal

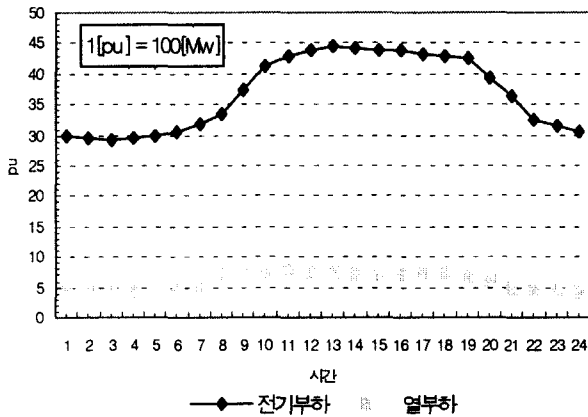


그림 7. 전기와 열의 연간 부하곡선

Fig. 7 Yearly Load Curve of Thermal and Electric Load

대상 모선에서는 200대가 동시에 운전되는 것으로 가정하였다.

③ 부하 모선의 연간 부하패턴은 4계절(춘, 하, 추, 동)로 나누고, 각 계절은 24시간의 일 부하 형태로 나타내었으며, 연료전지는 연간 8,640시간 동안 운전된다고 가정하였다. 연간 부하는 각 시간대별로 4계절의 총합으로 그림 7과 같고, 피크부하는 두 번째 계절(하계)의 13시에 발생한다.

④ 각 발전기의 기동정지 계획은 연간 일정한 값으로 가정하였으며, 보일러의 고정 비용도 고려하지 않았다.

⑤ 연료전지의 복수대 도입에 대한 계산도 제한한 알고리즘을 축차적으로 적용하면 가능하지만, 여기서는 고려하지 않았다.

4.2 시뮬레이션의 결과

전 절의 모델 계통과 시뮬레이션 조건하에서, 연료전지가 전력만 공급하는 경우와 전력과 열을 동시에 공급하는 두 가지 경우로 나누어 시뮬레이션을 수행하였다. 이들 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 전력공급만 고려한 경우

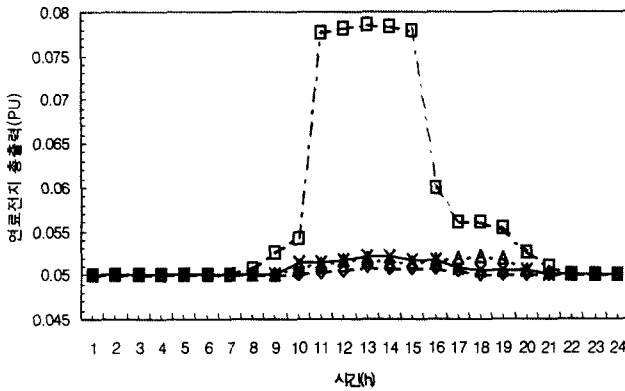
우선, 표 3은 기존의 패널티 계수(PF)와 본 논문에서 제안한 우선순위에 의한 산정 결과를 비교하여 나타낸 것으로서, 전자의 패널티 계수를 작은 순서대로 나열한 것과, 후자의 평가지수가 큰 순서대로 나열한 두 경우에 대한 후보 모선의 우선순위가 동일함을 알 수 있다. 이들 결과로부터, 연료전지가 전력만 공급하는 경우에는 도입 메리트가 가장 적은 5번 모선을 제외하고, 6번, 7번, 8번 모선을 도입 후보 모선으로 결정하고, 이들 후보 모선에 대하여 상세한 총 비용을 계산하여 최적 모선을 결정함으로써 계산 부담을 경감시킬 수 있음을 알 수 있다. 그림 8은 각 도입 후보 모선에 대한 시간대별 연료전지의 최적운용 결과(전기적 출력)를 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이, 연료전지의 출력이 연간에 걸쳐 아주 낮은 값으로 결정되는데, 이것은 운용 비용이 화력발전기에 비해 상대적으로 큰 연료전지의 출력 배분이 낮게 결정되기 때문이다. 즉, 열적 메리트를 고려하지 않은 연료전지는 경제적인 메리트가 화력발전기에 비해 작음을 확인 할 수 있다. 또한, 이 그림에서 전력수요가 증가하는 하계에는 낮 시간 동안 연료전지의 출력이 크게 증가하고 있음을 보이고 있는데, 이것은 화력발전기의 출력으로 부하를 모두 만족하지 못하기 때문에 운용비가 비싼 연료전지도 가동됨을 알 수 있다. 또한, 표 4에서는 모든 후보 모선에 대하여 연간 시간대의 총 운용비용을 산정한 결과를 나타내었는데, 이들 결과와 표 3의 우선순위법의 결과와 비교하면 순위가 일치함을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서 제안한 우선순위법의 유용성을 확인할 수 있다.

한편, 표 3과 표 4에서 알 수 있듯이 연료전지의 도입 메리트(평가지수)가 아주 적거나 음의 값을 가지는데, 이것은 전력만을 공급하는 경우, 연료전지는 경제성이 낮거나 거의

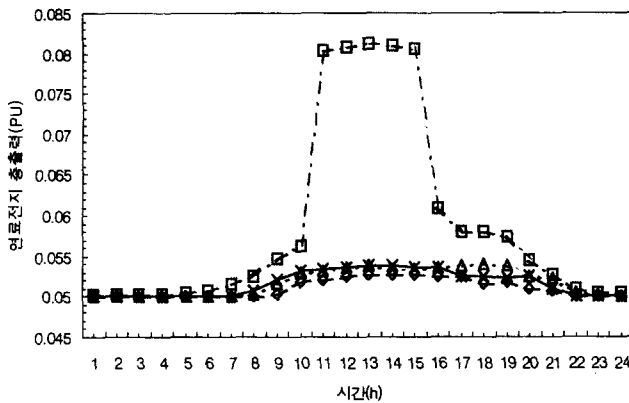
표 3. 패널티 계수(PF)와 우선순위법의 결과비교

Table 3 Results of Both Penalty Factor and Priority Method

도입 모션	PF	발전기 비용(천원)	연료전지 비용(천원)	총비용 (천원)	평가 지수(%)	우선 순위
도입전	-	160,786.8	-	160,786.8	-	-
5	0.6807	158,970.6	1684.6	160,655.2	0.0818	4
6	0.6485	158,761.1	1750.2	160,511.2	0.1714	2
7	0.6757	158,945.2	1694.2	160,639.4	0.0916	3
8	0.6444	158,648.8	1759.1	160,407.9	0.2356	1



(a) 5번 모션 도입시



(b) 8번 모션 도입시

—○— 4,5,6월 —□— 7,8,9월 ...△... 10,11,3월 —×— 12,1,2월

그림 8. 연료전지의 시간대별 출력패턴 (전력공급)

Fig. 8 Output Pattern of Fuel Cell Systems

표 4. 연간 총 비용 (전력공급)

Table 4 Total Cost of Yearly Time Interval

도입모션	총 비용(만원)	평가지수 (%)	우선순위
도입전	83,630,270	-	-
5	84,164,630	-0.6390	4
6	84,137,510	-0.6065	2
7	84,161,290	-0.6350	3
8	84,124,720	-0.5912	1

없음을 알 수 있다. 이것은 연료전지가 아직 개발 단계에 있기 때문에, 운용 비용이 기존의 화력발전기에 비하여 고가이므로, 연료전지의 폐열을 활용한 열적 메리트까지 고려하지 않으면 안 된다는 사실을 보여준다.

(2) 열병합을 고려한 경우

표 5는 연료전지의 열병합을 고려한 경우의 기존의 패널티 계수에 의한 결과와 본 논문에서 제안한 우선순위법에 의한 순위산정 결과를 비교한 것으로, 상기의 전력만 공급한 결과와 거의 일치함을 알 수 있다. 표 6은 연료전지가 도입되어 운용되는 경우, 열 부하를 공급함으로써 기존의 보일러를 대체하는 효과를 정량적으로 산정한 값이다. 이 표에서는 각 후보 모션별로 연료전지의 도입 전·후에 대한 총 비용을 나타냈으며, 또한 평가지수와 보일러의 절약 비용을 산정하였다. 그림 9는 표 5와 표 6의 평가지수를 종합한 총 평가지수를 나타낸 것이다. 이들 결과로부터, 전기와 열적 메리트(총 평가지수)가 가장 작은 5번 모션을 제외하여 총 시간대에 대한 상세한 해석을 수행함으로써 계산시간의 부담을 경감시킬 수 있다.

한편, 표 7과 표 8, 그림 10은 각 후보 모션별로 연간 시간대에 따른 총 비용과 보일러의 절약 비용, 총 평가지수를 나타낸 것인데, 우선순위법의 결과(표 5, 표 6, 그림 9)와 거의 동일한 양상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그림 9와 그림 10을 비교하면, 7번 모션이 6번 모션보다 연료전지의 정격출력 운전시간이 더 길기 때문에 열 출력이 크게 되어, 보일러의 절약 비용이 증가하여 우선순위가 바뀔 수도 있음을 알 수 있다. 그러나, 본 논문에서 제안한 알고리즘은 평가지수가 작은 후보 모션을 제외하는 알고리즘이므로, 최적 후보모션을 선택하는 데에는 큰 영향이 없다. 따라서, 본 논문에서 제안한 우선순위법의 유용성을 확인할 수 있다.

또한, 그림 11에서는 각 도입 후보모션에 대한 시간대별 연료전지의 최적 운용 결과를 나타낸 것으로, 전력공급만 고려한 그림 8과 비교하면, 연료전지의 출력이 년간에 걸쳐 아주 높게 결정되고 있다. 이것은 운용비용이 화력발전기에 비해 상대적으로 큰 연료전지이지만, 열적인 메리트까지 고려되어 출력 배분이 높게 결정되기 때문이다. 즉, 연료전지의 열적 메리트까지 고려하면, 연료전지의 경제적인 메리트가 기대될 수 있음을 확인할 수 있다.

표 5. 패널티 계수와 우선순위법의 결과비교 (열병합)

Table 5 Comparison of Penalty Factor and Priority Method

도입 모션	PF	발전기 비용 (천원)	연료전지 비용 (천원)	총 비용 (천원)	평가 지수 (%)	우선 순위
도입전	-	160,786.8	-	160,786.8	-	-
5	0.6807	158,970.6	1,684.6	160,655.2	0.0818	4
6	0.6534	157,200.5	3,073.3	160,273.9	0.3190	2
7	0.6803	157,368.7	3,073.3	160,442.0	0.2144	3
8	0.6501	157,035.5	3,073.3	160,108.8	0.4217	1

표 6. 연료전지 도입 전·후의 보일러 운용비용 및 절약비용 (우선순위법)

Table 6 Boiler Cost Considering Fuel Cell Systems

도입 모션번호	도입전 비용 (천원)	도입후 비용 (천원)	보일러 절약비용 (천원)	평가지수 (%)
5	301	0.0	301	3.7037
6	2,752	1,051.9	1700	20.9189
7	2,580	879.9	1700	20.9189
8	2,494	793.9	1700	20.9189

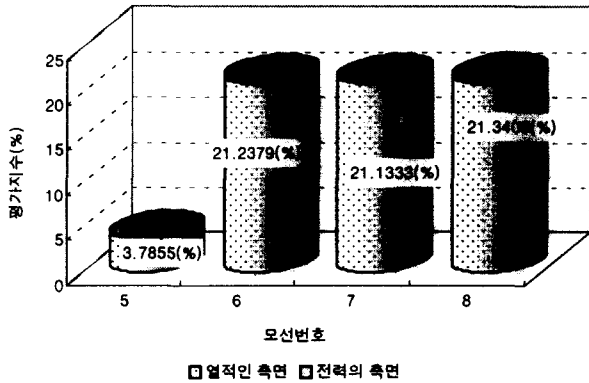


그림 9. 도입 후보모션별 총 평가지수 (우선순위법)

Fig. 9 Total Performance Index of Each Candidated Bus

표 7. 연간 시간대의 총 비용 (열병합)

Table 7 Total Cost of Yearly Time Interval

도입모션	총 비용(만원)	평가지수 (%)	우선순위
도입전	83,630,270	-	-
5	84,173,930	-0.6501	4
6	84,080,100	-0.5387	2
7	84,131,960	-0.5999	3
8	84,043,640	-0.4943	1

표 8. 보일러의 연료비 및 평가지수 (총 시간대)

Table 8 Boiler Cost and Performance Index

도입후보 모션번호	도입전비용 (천만원)	도입후비용 (천만원)	평가지수 (%)	우선 순위
5	1,827.2	733.2	6.3392	4
6	2,798.8	978.2	8.4579	3
7	3,051.6	1,160.1	10.0311	2
8	3,887.4	1,207.7	10.4425	1

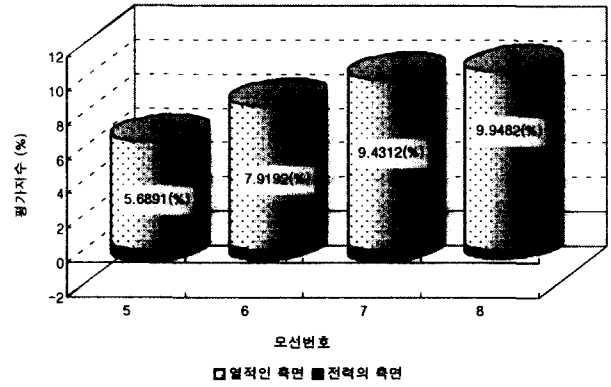
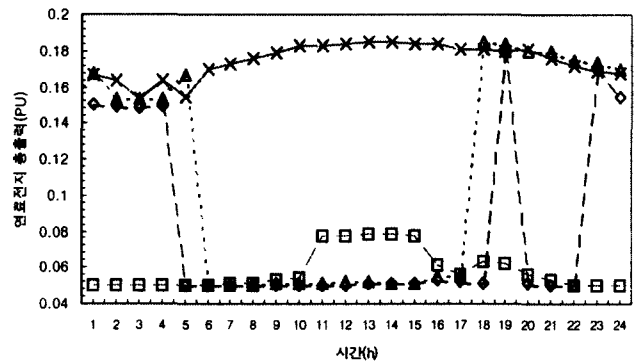
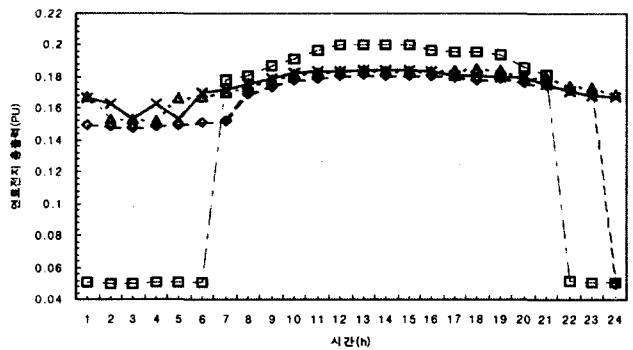


그림 10. 도입 후보모션별 총 평가지수 (총 시간대)

Fig. 10 Total Performance Index of Each candidated Bus



(a) 5번 모션 도입시



(b) 8번 모션 도입시

—◇— 4,5,6월 —□— 7,8,9월 ...△... 10,11,3월 —×— 12,1,2월

그림 11. 연료전지의 시간대별 출력패턴 (총 시간대)

Fig. 11 Output Pattern of Fuel Cell Systems

5. 결 론

본 논문에서는 전력계통에 있어서 연료전지의 최적 도입 계획 결정알고리즘을 제안하였다. 그 특징 및 시뮬레이션 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 라그랑주 함수와 Kuhn-Tucker의 최적 조건에 의하여, 연료전지의 최적 운용조건 식을 유도하였으며, 이에 근

거한 최적운용 알고리즘을 제안하였다.

(2) 연료전지의 도입 모선을 효율적으로 결정하기 위하여, 피크시간대의 총 비용을 비교·평가하여 순위를 나열하는 우선순위법을 제안하였다. 또한, 기존의 패널티 계수에 의한 후보모선 선정방법과 비교하여, 본 논문에서 제안한 우선순위법에 의한 알고리즘의 유용성을 확인하였다.

(3) 전기적인 메리트뿐만 아니라 열적인 메리트까지 정량적으로 평가하는 지수와 보일러의 연료비 경감까지 고려한 총 평가지수를 정의하여 포괄적인 평가수법을 제안하였다.

(4) 본 논문에서 제안한 알고리즘은 폐열을 활용한 열병합 운전을 상정하여 연료전지의 최적 운용과 최적 도입장소를 결정하는 것이므로, 열병합 운전이 가능한 다른 형태의 분산형 전원에 대한 경제성 평가에도 적용할 수 있다.

연료전지는 도입 초기에는 소규모이고, 분산적인 전원의 특성을 가진다는 측면에서, 전력회사보다 병원이나 호텔과 같은 수용가용이 보다 적합한 설비라고 생각될 수 있다. 그러나, 가까운 장래에는 지구 규모의 환경문제와 대체에너지 전원의 확보하는 차원에서, 전력회사의 차세대 에너지원으로서 중요한 역할을 수행하리라고 생각된다. 이것은 연료전지를 수용가 근방에 설치하여 운용함으로써, 부하평준화와 송전손실 저감, 설비이용 효율향상 등의 다기능 운전을 할 수 있다는 장점 때문에, 기존의 대용량 전원의 단점을 극복할 수 있는 중요한 하나의 대안으로 고려되고 있다.

참 고 문 헌

- [1] 임희천 : "100kW급 용융탄산염형 연료전지 발전시스템 개발", 대한 전기협회 전기저널 7월호, pp. 16-27, 2000.
- [2] 노대석 외 : "분산형 전력저장시스템의 도입평가에 관한 연구", 일본 전기학회논문지B, 116권 2호, 1996.
- [3] 노대석 외 : "배전계통기술의 신조류", 전기학회지. Vol 49, No.4, pp. 31-39, 2000.
- [4] 심헌 외 : "전력공급면에서 열병합 분산형전원의 최적 도입계획에 관한 연구", 전력계통연구회 춘계학술회 논문집. pp. 104-108, 2000.
- [5] 심헌 외 : "배전계통에 있어서 열병합 분산형전원의 최적 도입계획에 관한 기초적 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 A. pp. 513-515, 2000.
- [6] 심헌 외 : "배전계통에 있어서 열병합 분산형전원의 최적 도입계획에 관한 연구(II)", 대한전기학회 추계학술대회 논문집 A. pp. 67-69, 2000.
- [7] 송길영 : "전력공학연습", 동일출판사, 1999.
- [8] 芳賀 善浩 : "전력계통에 있어서 분산형전원의 배치·운영계획 및 경제성평가에 관한 연구", 북해도 대학교 공학연구소 석사논문, 1991.
- [9] 桑山 顯 외 : "전력저장시스템을 고려한 열병합 분산형전원의 경제운용 및 최적 도입계획 결정수법", 일본 전기학회논문지B, 117권 No.1, pp. 19-26, 1997.
- [10] 田淵 英明 : "전력계통내 에너지 저장 시스템의 경제성평가에 관한 연구", 북해도대학교 공학연구소 석사 논문, 1994.
- [11] 일본 전기협동연구회 : "전기협동연구", 제47권 1호, 1991. 7.
- [12] H.H. Happ : "Optimal Power Dispatch-A Comprehensive Survey", IEEE Transaction on PAS, Vol.96. No.3. pp. 841-854, 1977.
- [13] A.J. Wood and Wollenberg : "Power Generation Operation and Control", John Wiley & Sons, 1984.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호: 2000-1-30200-006-3) 지원으로 수행된 결과의 일부임

저 자 소 개



노 대 석 (盧大錫)

1964년 2월 21일 생. 1985년 고려대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 3월 일본 북해도대 전기공학과 졸업(공학). 1987년~1998년 한국전기연구소 근무. 1999~현재 한국기술교육대 정보기술공학부 조교수.

Tel : 041-560-1167

E-mail : dsrho@kut.ac.kr



심 헌 (沈憲)

1973년 8월 26일 생. 1996년 순천향대 공대 전기공학과 졸업. 2001년 한국기술교육대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년~현재 (주) 에스에너지 연구원.

Tel : 02-2297-7714

E-mail : hshim@s-energy.co.kr



오 용 택 (吳龍澤)

1958년 6월 17일 생. 1980년 숭실대 전기공학과 졸업. 1982년 연세대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1987년~1991년 한전 정보처리처 과장. 1991년~1996년 한국기술교육대 조교수. 1996년~현재 전기

공학과 부교수.

Tel : 041-560-1161

E-mail : ytoh@kut.ac.kr



최 재 석 (崔在錫)

1958년 4월 29일 생. 1981년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1996년~1997년 University of Saskatchewan 방문교수. 1991년~현재 경상대 전기전자공학부 부교수.

Tel : 055-751-5347

E-mail : jschoi@nongae.gsnu.ac.kr



차 준 민 (車濬敏)

1964년 5월 9일 생. 1989년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1996년~현재 대전대 전기공학과 조교수.

Tel : 031-539-1915

E-mail : chamin@road.daejin.ac.kr