

마이크로 전력계통에서 연료전지 발전시스템의 전기/열의 최적운영 기법 연구

논 문

58-6-6

Optimal Electricity and Heat Production Strategies of Fuel Cell Device in a Micro-grid Energy System

이 주 원* · 박 종 배[†] · 김 수 덕** · 김 창 섭***

(Joo-Won Lee · Jong-Bae Park · Su-Duk Kim · Chang-Seop Kim)

Abstract - Alternative energy sources such as renewable energy like solar power systems, wind power systems, or fuel cell power systems has been the rising issue in the electrical power system. This paper discusses an economic study analysis of fuel cells in the Korean electricity market. It includes the basic concept of a fuel cell and the Korean electricity market. It also describes the need of renewable energy and how the fuel cell is connected with the local grid. This paper shows the impact of production and recovering thermal energy of a grid-connected fuel cell power system. The profit maximization approach has been structured including electrical power trade with the local grid and heat trade within the micro-grid. The strategies are evaluated using a local load that uses electric and thermal power which has different patterns between summer and winter periods. The solution algorithm is not newly developed one, but is solved by an application called GAMS. Results indicate the need and usefulness of a fuel cell power system.

Key Words : Micro-grid, Fuel Cell, UC(Unit Commitment)

1. 서 론

경제 및 산업의 성장으로 인하여 전력 수요는 매년 지속적으로 상승하고 있으며, 이러한 성장 수요를 만족하기 위하여 더욱 많은 발전소의 신규 건설이 요구되고 있다. 이러한 성장하는 수요를 만족시키기 위한 발전설비들은 원자력, 석탄, 천연가스, 그리고 석유 등이 있으며, 원자력을 제외한 대부분의 발전설비들은 화석연료를 사용하고 있으며 이는 곧 고갈될 것이라는 전망이 있다. 특히 석유의 매장량은 현재 약 반세기정도 밖에 남아 있지 않다고 한다. 전력 산업은 황산화물(SOX), 이산화탄소(CO₂), 질산화물(NO_x), 그리고 기타 중금속의 배출이 상당한 양을 차지하고 있어, 모든 산업 가운데에서도 손꼽을 수 있는 가장 친환경적이지 못한 산업 중 하나이다[1-3].

이러한 이유로 신재생 에너지원, 즉, 태양광, 풍력발전, 또는 연료전지 등과 같은 대체에너지원의 공급은 적절한 수준에서 필요불가결하다. 이러한 신재생에너지를 전력계통에 도입함으로써 다양한 에너지의 공급이 가능하여 에너지 안보의 확보와 더불어 환경 친화적인 전력공급이 가능해진다[4].

우리나라의 전력시장은 현재 상당한 규제를 받고 있는 비용기반전력풀(CBP: Cost-Based Pool)이다. CBP 시장구조에

서는 신재생 에너지 전원에 대하여 상당 수준의 보조금이 발전차액정상제도를 통하여 제공되고 있다. 하지만 이는 전기요금의 지속적인 상승을 초래할 수 있으며 대부분의 자원이 제어 불가능하므로 이로부터의 계통운용의 경직성 등을 초래할 수 있다[5].

분산형 전원의 일환인 연료전지 발전설비는 기존의 중앙 집중형 발전설비에 비하여 더 적은 환경오염 배출과 낮은 소음, 높은 효율 그리고 다양한 공급 연료에 기반하고 있으며, 소비자들에게 안정적인 전력공급을 담당하는 하나의 대안으로 고려될 수 있을 것이다[4-9].

본 논문에서는 전력시장 및 열시장이 완전히 개방되어 있는 경우와 그렇지 않은 경우를 대상으로 연료전지 발전시스템의 최적 운영 전략을 도출하였다. 해당 소비자의 경우, 열과 전기의 수요가 동시에 존재하며 이들은 특정 연료전지사업자에 의하여 공급을 받는다는 가정을 하였다. 또한, 이러한 연료전지사업자는 잉여의 전기 및 열을 외부에 판매할 수도 있으며, 부족분 뿐만 아니라 상시에도 외부로부터 구입이 가능하다는 가정을 두었다. 따라서 해당 연료전지사업자는 포획소비자에게 전기 및 열을 공급함과 동시에 수익을 극대화하기 위한 다양한 옵션을 가지고 있는데 이는 자체생산, 외부구입, 외부판매 등으로 구성된다. 즉, 본 논문의 목적은 연료전지시스템 및 외부의 자원을 활용하여 해당 사업자의 수익을 극대화하기 위한 최적 포트폴리오를 구성하는데 기본 목적을 두고 있다[10-11].

연료전지에 관한 연구는 오래전부터 이루어지고 있었으며, 현재도 매우 활발하게 진행되고 있다. 약 160년 전에 Sir William Grove가 최초의 연료전지를 개발하였고, 50여년 이후에 실제로 “연료전지”라는 명칭이 부과된 전지가 발명되었다[1]. 그 후로 많은 응용 연구가 있었고, 1996년에 Y.

[†] 교신저자, 정회원 : 건국대학 전기공학과 부교수 · 공박

E-mail : jbaepark@konkuk.ac.kr

* 정 회원 : 건국대학 전기공학과 박사과정

** 정 회원 : 아주대학 에너지학과 부교수 · 경제박

*** 정 회원 : 경원대학 전기공학과 교수 · 공박

접수일자 : 2008년 6월 19일

최종완료 : 2009년 5월 6일

Zoka는 배전계통 내에서의 연료전지의 최적 구조에 대하여 소개한 바 있으며[12], 2002년에는 Cameron L. Smallwood에 의하여 마이크로 그리드에서의 분산형 전원을 설계에 대한 연구가 진행된 바 있다[13]. 또한 최근에, 2006년, El-Sharkh는 PEM 연료전지의 최적운동을 비용측면에서 접근하여 계산하였다[14].

본 논문에서는 기존 사례를 참고하고 국내 현 시점에서의 상황을 고려하여 전력 및 폐열에 대한 재판매를 적용하여 연료전지 발전 사업자의 수익 수준을 분석한 것으로, 최적운동을 위한 다양한 옵션을 적용하여 구현하였다. 본 논문에서는 연료전지의 수입 및 운영 사항을 일반화하기 위하여 기동정지계획(UC: Unit Commitment)에 기반한 시물레이션을 수행하였다. 또한 사례연구를 위한 시물레이션은 하절기 및 동절기의 각각 특정 1개월을 선정하여 시행하였다. 각 사례연구에서는 다양한 에너지산업구조를 대상으로 최적 운영 전략을 도출하여 개발한 알고리즘의 타당성을 입증하였다. 본 논문의 제2장에서는 본 논문에서 사용한 수학적 정형화에 대하여 설명하였다. 그리고 제3장에서는 사례연구로써 이에 관한 시물레이션의 결과 및 수치의 분석을 보여주었으며, 제4장에서는 전체적인 결론을 서술하였다.

2. 연료전지 최적운동을 위한 수학적 정형화

2.1 목적함수

본 논문에서 고려하는 목적함수는 일정기간 동안의 연료전지 공급자의 총이익의 극대화를 대상으로 하였다. 수입 및 비용 요소는 그 특징에 따라서 여러 가지 요소로 구성된다.

$$\text{목적함수} = \max\left(\sum_t \text{수입} - \sum_t \text{비용}\right) \quad (1)$$

상기 목적함수의 전항은 연료전지사업자가 일정기간 동안 얻게 되는 총 수입을 말하며, 이는 연료전지로부터 발생하는 잉여 전력 혹은 잉여 열을 외부 전력시장 및 열시장에 판매함으로써 발생하는 것만 고려하였다. 즉, 포획소비자에의 공급에 따른 수입요소는 본 목적함수에서 배제하였지만 이를 포함할 경우에도 동일한 결과를 도출한다. 목적함수의 두 번째 항은 연료전지사업자의 총비용을 의미하며 이는 연료전지의 발전을 위한 연료비용, 전력회사로부터 구입하는 전력요금, 연료전지의 기동비용, 그리고 인근 열사업자 및 열시장으로부터 구입하는 난방비용 등으로 구성된다. 또한 이후의 제약조건에서 언급하겠지만, 해당 연료전지사업자는 일정 수준의 포획소비자를 가지고 있으며 이에 대한 전기 및 열의 공급의무가 있다고 가정하였다.

2.1.1 수입의 정형화

여기에서는 목적함수의 수입의 구성요소에 대하여 상세하게 언급하기로 한다.

2.1.1.1 전력시장에 판매에 따른 전력수입

앞에서 가정한 바와 같이 연료전지사업자는 잉여의 전력을 계통한계가격(SMP: System Marginal Price, 혹은 MCP: Market Clearing Price)으로 전력시장에 판매할 수 있다. 즉, 해당 연료전지 사업자는 생산된 전력을 전력계통으로 판매가 가능하며 그 수입수준은 아래의 식과 같이 결정된다.

$$SE_{1,t}(P_{1,t}, P_{2,t}, ED_t) = SMP_t \times \max(0, P_{1,t} + P_{2,t} - ED_t) \quad (2)$$

여기서 SMP_t 는 시간 t 에서의 전력시장가격을 의미하며, $P_{1,t}$ 는 시간 t 에서 전력시장으로부터 구입한 전력량, $P_{2,t}$ 는 연료전지의 발전량을 의미한다. 또한, ED_t 는 시간 t 에서의 해당 소비자의 전력수요를 나타낸다.

2.1.1.2 잉여 열의 판매수입

연료전지가 전기를 발전하게 되면, 그에 따라 부수적으로 열에너지가 발생하게 된다. MCFC와 같은 고온형 연료전지는 폐열을 이용하여 난방에 사용할 수 있다. 이 부분에 대한 수입은 다음과 같이 수식화 할 수 있다.

$$SH_{1,t}(H_{1,t}, H_{2,t}, HD_t) = \beta_t \times \max(0, H_{1,t} + H_{2,t} - HD_t) \quad (3)$$

여기서, β_t 는 해당 시간대의 열판매가격을 나타내며, $H_{1,t}$ 는 시간 t 에서 인근 열공급사업자 혹은 열시장으로부터 구입한 난방량이며 $H_{2,t}$ 는 연료전지의 발전에 따른 열 발생량이다. HD_t 는 시간 t 에서의 포획소비자의 열 수요를 의미한다.

상기 두가지 구성요소로 인하여 특정 시간동안의 연료전지 사업자의 총 수입은 다음과 같이 간략화 된다.

$$\sum_t \text{Revenue}_t = \sum_t \{SE_{1,t}(P_{1,t}, P_{2,t}, ED_t) + SH_{1,t}(H_{1,t}, H_{2,t}, HD_t)\} \quad (4)$$

2.1.2 비용의 정형화

여기에서는 목적함수의 비용의 구성요소에 대하여 설명하고자 한다.

2.1.2.1 전력구입 비용

본 절에서의 비용은 포획소비자가 전력회사로부터 구입하는 비용으로, 포획소비자에 대한 전기요금 수준은 전력회사 혹은 해당 연료전지사업자로부터 사전에 결정되어 있다고 가정한다. 마이크로 그리드 계통은 연료전지가 필요 전력을 모두 공급하지 못하거나 전력회사로부터 구입하는 전력비용이 연료전지 전력생산 단가보다 낮을 경우 전력을 구입할 수, 즉, 전력의 재판매가 가능하다고 가정하였다. 해당 소비

자의 전기요금은 기본요금과 단위 kWh에 대한 전력량 요금 (즉, Two-Tariff 시스템)으로 가정하였으며 이는 일반적으로 아래와 같이 정형화할 수 있다.

$$C_{1,t}(P_{1,t}) = c_{P1} + c_{P2} \times P_{1,t} \quad (5)$$

여기서 $P_{1,t}$ 은 시간 t 에 전력계통으로부터 수전한 전력량 (kW)이며, c_{P1} 은 기본요금(₩), 그리고 c_{P2} 는 시간 t 에서 전력량요금(₩/kWh)을 나타낸다.

2.1.2.2 연료전지의 발전비용

이 비용은 연료전지가 발전하기 위하여 구입하는 천연가스의 비용을 말하며 일반적으로 다음과 같이 표현된다.

$$C_{2,t}(P_{2,t}) = c_{Fuel} \times \frac{P_{2,t}}{\eta_{FC}} \quad (6)$$

여기서 $P_{2,t}$ 는 시간 t 에 연료전지의 발전량(kWh)이며, c_{Fuel} 은 연료비 단가(₩/Mcal), 그리고 η_{FC} 는 연료전지의 효율(kWh/Mcal)을 나타낸다.

2.1.2.3 난방 구입비용

이는 포획소비자에게 난방을 공급하기 위하여 인근의 열공급자로부터 구입하는 비용을 나타내며 전력구입비용과 마찬가지로 기본요금과 사용량 요금으로 구분된다고 가정하였다. 이를 수식화하면 다음과 같다.

$$C_{3,t}(H_{1,t}) = c_{heat1} + c_{heat2} \times H_{1,t} \quad (7)$$

여기서 c_{heat1} 는 기본요금(₩/m²)으로 수요 지역의 단위 평방미터당 부과되며, c_{heat2} 는 사용량 요금단가(₩/Mcal)이다. $H_{1,t}$ 는 인근의 혹은 독점적 열공급사업자로부터 구입해오는 열량(Mcal)을 나타낸다.

상기 세 가지의 비용요소를 고려한 특정 시간 동안의 비용은 아래와 같이 간략화될 수 있다.

$$\sum_t Cost_t = \sum_t \{C_{1,t}(P_{1,t}) + C_{2,t}(P_{2,t}) + C_{3,t}(H_{1,t})\} \quad (8)$$

2.1.3 연료전지 발전에 따른 배열

연료전지 발전에 따른 배열을 이용함으로써 열공급에 대한 추가적인 비용은 발생하지 않으며, 이 배열은 연료전지의 전기적 출력에 대한 함수로 표현할 수 있다.

$$H_{2,t} = f(P_{2,t}) = \gamma \times P_{2,t} \quad (9)$$

여기서 γ 는 전기-열 변환상수(Mcal/kW)를 의미한다.

2.2 제약조건

본 논문에서 고려하고 있는 일반적인 제약조건은 아래의 식과 같다. 이는 구체적으로 연료전지 발전시스템의 최대 및 최소용량과 관련된 제약, 증감발출과 관련된 제약, 의무가동 시간(UP 및 DOWN)과 관련된 제약 조건 등으로 구성된다. 아래의 수식에서 $X_2^{on}(t)$ 는 t 시간까지 연료전지시스템이 연속적으로 가동한 시간[hours]을 의미하며, $X_2^{off}(t)$ 는 t 시간까지 연료전지시스템이 연속적으로 정지한 시간[hours]을 의미한다.

$$\begin{aligned} P_2^{\min} &\leq P_{2,t} \leq P_2^{\max} \\ P_{2,t-1} - P_{2,t} &\leq \Delta P_2^{\text{up}} \\ P_{2,t} - P_{2,t-1} &\leq \Delta P_2^{\text{down}} \\ X_2^{\text{on}}(t) &\geq MUT_2 \\ X_2^{\text{off}}(t) &\geq MDT_2 \end{aligned} \quad (10)$$

또한, 상기의 식이 연료전지 발전시스템의 제약을 의미하는데 반하여 아래의 식은 해당 포획소비자에 대한 전력 및 열공급과 관련된 수급제약조건이다.

$$\begin{aligned} P_{1,t} + P_{2,t} &\geq ED_t \\ H_{1,t} + H_{2,t} &\geq HD_t \end{aligned} \quad (11)$$

상기 식에서 생산전력 및 구입전력의 합이 필요 전력보다 크거나 같은 이유는 필요시 생산된 전력을 계통으로 판매할 수 있다는 가정을 하였기 때문이다. 열 또한 마찬가지로 이유로 인하여 일종의 수급균형식이 상기와 같이 정형화될 수 있다.

3. 사례 연구

본 논문에서 사용한 연료전지 모델은 250-kW 수준의 연료전지 시스템으로 송전망에 연계되어 있다고 가정하였고, 기타 연계 장치 및 동기화 장치는 내포되어 있다고 가정하였다. 또한, 전력 및 열 수요 데이터는 매 시간별로 주어졌다고 가정하였으며, 전력시장의 계통한계가격(SMP)는 매 시간별로 주어졌다고 가정하였다. 아래의 (표 I)은 본 연구에서 고려한 연료전지 발전시스템의 여러 가지 변수 및 기타 입력데이터를 정리한 것이다. 잉여 열의 판매 가격은 현재로서는 실제로 열 시장이 없기 때문에 구입 가격보다 약간 낮은 수준으로 인위적으로 책정하였다.

표 1 입력 데이터 요약

Table 1 Input Data

연료전지의 최대 용량, P_2^{\max} (kW)	250
연료전지의 최소 용량, P_2^{\min} (kW)	0
연료전지의 증발률, ΔP_2^{up} (kW/h)	20
연료전지의 감발률, ΔP_2^{down} (kW/h)	25
연료전지의 최소 운전시간, MUT_2 (number of hours)	2
연료전지의 최소 정지시간, MDT_2 (number of hours)	2
천연가스 구입가격 (LNG), c_{Fuel} (₩/kWh)	28.67
기본 전기요금, c_{P_1} (₩/month)	14,400
전력량 전기요금, c_{P_2} (₩/kWh)	132.5
기본 난방 요금, c_{heat1} (₩/month)	3,105.42
동계 난방 사용량 열 요금, c_{heat2W} (₩/Mcal)	54.65
하계 난방 사용량 열 요금, c_{heat2S} (₩/Mcal)	46.85
전력-열 변환 계수, γ (Mcal/kWh)	3.2
연료전지의 효율, η_{FC}	0.47
동계 난방 판매 가격, β_{1W} (₩/Mcal)	49.65
하계 난방 판매 가격, β_S (₩/Mcal)	41.85

본 논문에서는 다음과 같은 두가지 사례에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 첫 번째는 하절기인 경우로서 전력 수요는 높고 상대적으로 열 수요가 낮은 경우이다. 두 번째는 반대로 동절기를 상정한 것으로서 하절기에 비하여 전력수요는 약간 낮고 상대적으로 열 수요가 높은 경우이다.

또한, 각 사례에 대하여 4가지 상황을 구성하였으며 이는 아래의 표에 요약되어 있다. 상황 1의 경우는 전기, 열 모두 외부에 대한 판매가 불가능한 경우로서 제약식(11)은 다음과 같이 수정된다. 아래의 식에서 연료전지로부터 발생하는 열은 전력에 의하여 종속되며 전력수급식을 만족시키기 위해서는 열수급 등식은 부등식의 형태로 고려되어야 한다.

$$P_{1,t} + P_{2,t} = ED_t$$

$$H_{1,t} + H_{2,t} \geq HD_t \quad (12)$$

상황 2의 경우는 열의 외부에의 판매는 없지만 전력은 전력시장 등에 판매할 수 있는 전략으로 식(2)와 제약식(11)은 변함이 없고 식(3)이 상황 1에서처럼 목적함수에서 제외 된다. 상황 3의 경우, 전력의 외부에의 판매는 불가능하지만 열은 인근 열시장(혹은 열사업자 등)에 판매 가능한 것으로서 이러한 경우 제약 조건은 상황 1에서처럼 식 (12)가 된다. 또한 상황 4는 열, 전력 모두 판매 가능한 것으로 본 장에서의 기본식에서 변화가 없다.

표 2 사례 1과 사례 2에 대한 상황의 구성

Table 2 The strategies for case 1 and 2

상황	전력	열
1	외부 전력시장 판매 불가	외부 열시장 판매 불가
2	외부 전력시장 판매 가능	외부 열시장 판매 불가
3	외부 전력시장 판매 불가	외부 열시장 판매 가능
4	외부 전력시장 판매 가능	외부 열시장 판매 가능

본 논문에서는 전력시장에서 신재생 에너지에 대한 보조금 등은 없다고 가정하였으며, 본 사례연구에서의 최적해를 도출하기 위하여 GAMS의 비선형최적화 모듈을 사용하였다.

3.1 사례 1 (하절기)

사례 1은 하절기를 상정한 것으로서 전력 부하가 높고 상대적으로 열 수요가 낮은 경우이며 특정 1개월을 시뮬레이션의 대상으로 하였다. 입력 데이터로는 시간대별 전력 수요, 열 수요, 그리고 계통한계가격 등이 필요하며, 전력 및 열 수요는 특정 수용가의 실제 데이터를 적용하였고 계통한계가격은 우리나라 전력시장 실적을 기반으로 생성하였다. 즉, 본 사례에서는 전력수요, 열수요, 전력시장가격은 총 1개월 동안의 매일 24시간에 대하여 각각 744개의 데이터를 사용하였다. 아래의 자료는 사례 1에서 사용된 일간 기준의 시간대별 전력수요, 시간대별 열수요, 시간대별 전력시장 계통한계가격을 정리한 것이다.

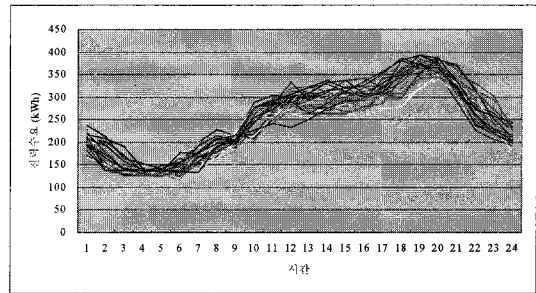


그림 1 사례 1(하절기)의 시간대별 전력 수요 패턴(2006년 8월)
Fig. 1 The power demand of the load for the summer period

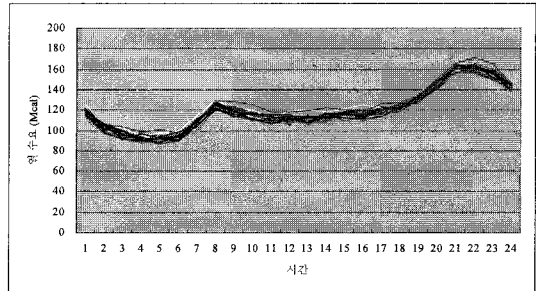


그림 2 사례 1(하절기)의 시간대별 열 수요 패턴(2006년 8월)
Fig. 2 The heat demand of the load for the summer period

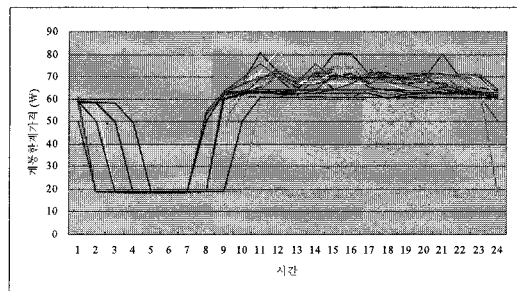


그림 3 사례 1(하절기)의 시간대별 계통한계가격(SMP) 패턴(2006년 8월)
Fig. 3 The system marginal price (SMP) for the summer period

사례 1에 대하여 상기 4가지 상황에 대한 시뮬레이션을 수행한 결과는 아래의 표에 요약되어 있다.

표 3 사례 1에 대한 결과 요약 (단위:원)

Table 3 Result Data of Case 1

		상황 1	상황 2	상황 3	상황 4
수입	전력판매	0	134,118	0	748,657
	난방판매	0	0	17,023,947	21,000,832
비용	연료전지	9,446,706	9,910,124	9,446,706	11,258,160
	전력구입	3,694,492	3,154,344	3,694,492	3,079,854
	난방구입	5,650	5,650	5,650	5,650
	수익	-13,146,848	-12,936,000	3,877,099	7,405,825

사례 1에서 난방 구입비용이 모두 동일한 수치를 나타내었으며, 이는 초기 연료전지가 기동하여 증발열의 제약으로 인하여 부산물인 폐열이 난방 수요를 만족하지 못하였기 때문에 나타난 수치다. 상황 1에서는 전력 및 난방의 판매가 없는 경우를 상정하였기 때문에 오직 비용만 존재하므로 수익은 음의 값을 갖는다. 이는 역으로 해당 소비자로부터 회수되어야 할 최소한의 변동비용을 나타내는 수치이기도 하다. 아래의 그림은 상황 1에서의 전력수요 및 열수요에 대한 연료전지의 발생 에너지와 외부에서의 구입의 구성비를 나타내는 것이다.

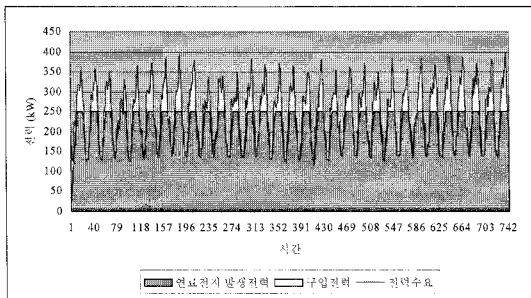


그림 4 상황 1의 전력수요, 연료전지 전력발생 및 전력구입량의 구성

Fig. 4 Cumulation of the generation of the fuel cell and the purchased power with the electrical demand for strategy 1

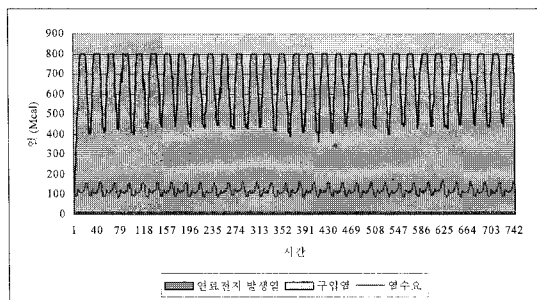


그림 5 상황 1의 열수요, 연료전지 열발생의 구성

Fig. 5 Cumulation of the heat exhausted by the fuel cell and the purchased heat with the heat demand for strategy 1

상황 1과 상황 2를 비교 하였을 때, 총 비용은 비슷한 수준이지만 상황 2에서는 전력 판매에 대한 수입이 일부 발생함으로써 해당 사업자의 수익성이 나아짐과 동시에 최적 전략을 구사할 수 있는 자유도가 높아짐을 알 수 있다. 또한, 상황 3과 상황 4에서는 잉여 난방을 외부에 판매 할 수 있기 때문에 사실상 모두 버려질 수 있는 폐열이 전부 수입으로 환산되어 수익이 양의 값을 갖게 되었다. 따라서 연료전지 사업자의 경우, 인근지역에서의 열시장의 존재 유무 혹은 포획소비자의 자체 열수요 수준 등에 의하여 경제성 및 최적운전 패턴이 상당히 달라짐을 알 수 있다.

3.2 사례 2 (동절기)

사례 2는 특정 동절기 1개월을 대상으로 최적 전략수립에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 사례 1과의 차이는 열 수요가 사례 1에 비하여 월등히 높다는 것이다. 이 경우에도 적용한 데이터는 실제 특정 1개월 동안의 전력 및 열 수요이며, 전력시장의 계통한계가격 또한 마찬가지이다. 아래의 자료는 사례 2에서 사용된 시간대별 전력수요, 시간대별 열수요, 계통한계가격을 정리한 것이다.

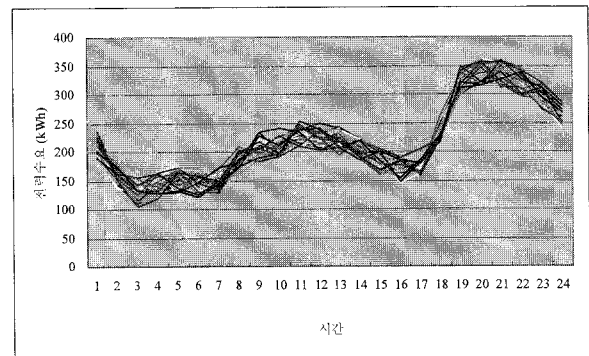


그림 6 사례 2(동절기)의 시간대별 전력수요(2006년 1월)

Fig. 6 The power demand of the load for the winter period

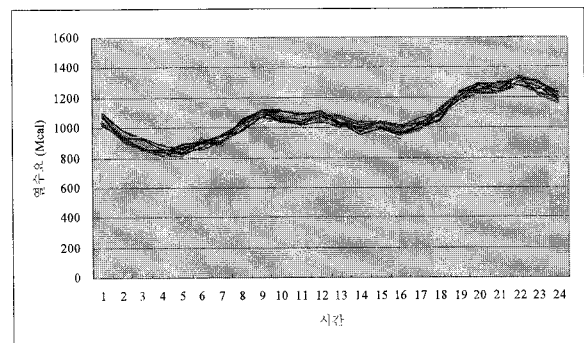


그림 7 사례 2(동절기)의 시간대별 열 수요(2006년 1월)

Fig. 7 The heat demand of the load for the winter period

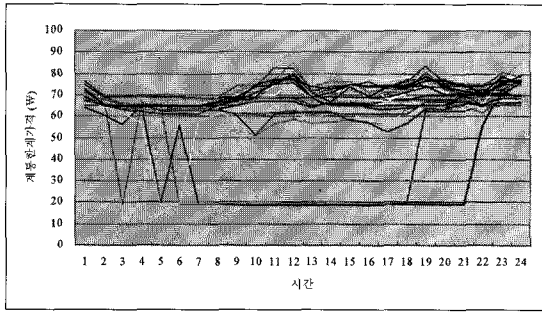


그림 8 사례 2(동절기)의 시간대별 계통한계가격(SMP) (2006년 1월)

Fig. 8 The system marginal price (SMP) for the winter period

사례 2의 4가지 상황에 대한 시뮬레이션의 결과는 아래의 표에 주어져 있다. 즉, 연료전지 발전비용, 전력구입비용, 열구입비용 및 전력 및 난방의 대한 판매 수입 등이 아래의 표에 요약되어 있다.

표 3 사례 2에 대한 결과 데이터 (단위 : 원)

Table 3 Result Data of Case 2

		상황 1	상황 2	상황 3	상황 4
수입	전력판매	0	2,290,627	0	2,290,627
	난방판매	0	0	0	0
비용	연료전지	8,504,187	11,258,160	8,504,187	11,258,160
	전력구입	2,964,506	1,661,214	2,964,506	1,661,214
	난방구입	18,598,166	10,702,842	18,598,166	10,702,842
수익		-30,066,860	-21,331,589	-30,066,860	-21,331,589

상황 1과 상황 3의 결과가 동일하게 나온 것은 연료전지의 부산물 폐열이 전력에 종속적이므로 상대적으로 낮은 전력수요 때문에 제약을 받게 되고 그 양은 열 수요보다 낮다. 따라서 나머지 부분을 충족하기 위하여 모두 구입하게 되어 열 판매량과 구입량이 두 상황에서 동일하기 때문이다. 그리고 상황 2와 상황 4의 결과가 동일하게 나온 것은 해당 소비자의 동절기의 열 수요가 상당히 높기 때문에 연료전지 발전 시 발생하는 부산물인 폐열이 열 수요를 모두 충족시키지 못하여 이를 자가 난방으로 활용하는 것이 경제적이기 때문에 부산물인 폐열을 모두 사용하고 나머지 수요에 대하여 모두 구입하기 때문에 나타나는 현상이다. 만약 열수요가 사례에 비하여 낮다면, 난방에 대한 수입 및 비용 부분에서 차이가 발생 할 것이라고 사료된다.

사례 2의 경우, 전력회사의 전기요금 수준보다 연료전지의 한계 발전비용이 낮을 경우, 연료전지 발전사업자는 연료전지의 발전량을 사용하지 않고 외부에 판매하며, 전력수요에 대하여 모두 외부로부터 구입하여 사용하게 된다. 따라서, 이러한 시장사이 및 요금사이의 차액 발생으로 인하여 상당한 수익을 얻게 되어 전략적인 연료전지의 운전이 가능하게 된다. 만약, 전력의 재판매의 불가 및 부족분에 대하여 전력구입이 가능할 경우에는 상황 1의 결과로 귀결될 것이다.

아래의 자료는 상황 1과 상황 2에서의 시간대별 전력 및 열수요에 대한 연료전지 시스템이 차지하는 부분과 외부에서의 구입 부분을 정리한 것이다.

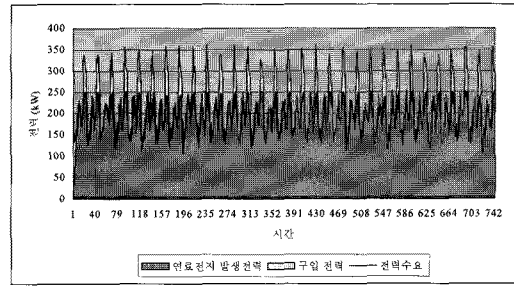


그림 9 상황 1에서의 연료전지 발전량과 구입전력량의 구성
Fig. 9 Cumulation of the generation of the fuel cell and the purchased power with the electrical demand for strategy 1

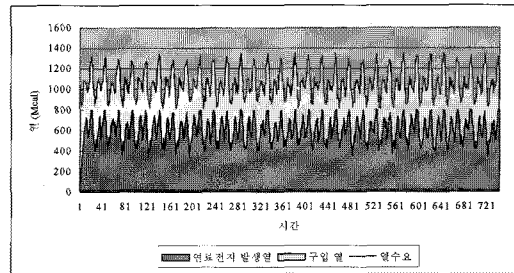


그림 10 상황 1에서의 연료전지 열생산량과 열구입량의 구성
Fig. 10 Cumulation of the heat exhausted by the fuel cell and the purchased heat with the heat demand for strategy 1

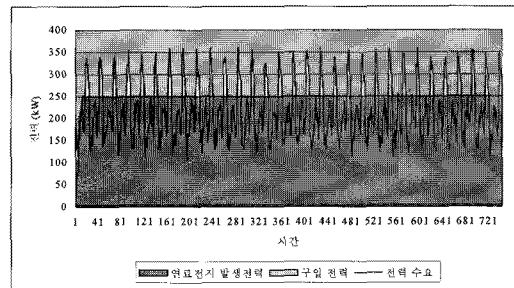


그림 11 상황 2에서의 연료전지 발전량과 전력구입량의 구성
Fig. 11 Cumulation of the generation of the fuel cell and the purchased power with the electrical demand for strategy 2

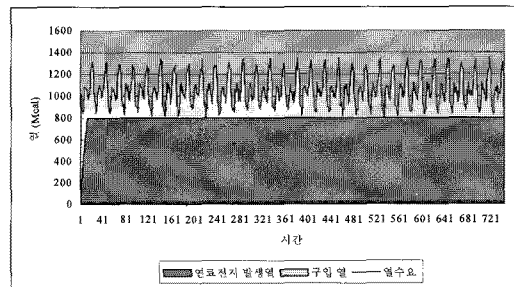


그림 12 상황 2에서의 연료전지 열발생량과 열구입량의 구성
Fig. 12 Cumulation of the heat exhausted by the fuel cell and the purchased heat with the heat demand for strategy 2

4. 결 론

본 논문에서는 계통 연계형 연료전지 발전시스템의 전기 에너지 및 열에너지의 생산 및 판매에 대한 최적 전략에 대한 수학적 정형화의 수립 및 사례 연구를 수행하였다. 이를 위한 에너지 산업구조로 연료전지 발전사업자는 전기 및 열 수요를 가지고 있는 포획소비자를 확보하고 있으며, 전기 및 열의 외부 구입을 통한 재판매가 가능할 뿐만 아니라 잉여(혹은 전략적인 차원)의 에너지를 외부에 시장가격으로 판매할 수 있다는 가정을 하였다. 마이크로 그리드에서의 연료전지 등과 같은 분산전원의 역할은 매우 커지만 기본적으로 이의 수익성 등의 극대화를 위해서는 수급계약조건 및 재판매 조건 등의 완화가 필수적임을 사례연구를 통하여 알 수 있었다. 사례연구에서 살펴볼 수 있는 바와 같이, 연료전지 시스템의 경우 해당 소비자가 열수요를 가지고 있거나 혹은 열을 판매할 수 있는 상황에서는 그 수익성이 높아짐을 알 수 있고 이는 부산물인 열의 활용도에 따라서 그 경제성이 매우 달라지게 됨을 의미한다. 본 연구에서는 비록 하나의 소비자 및 하나의 연료전지 시스템을 대상으로 수학적 정형화 및 사례연구가 이루어진 한계성을 가지고 있다. 향후에는 마이크로 그리드 내에서의 다양한 분산 전원 및 전력/열 수요가 존재할 경우에서의 최적 운용에 대한 전략 수립 및 방법론의 개발이 필요할 것이다.

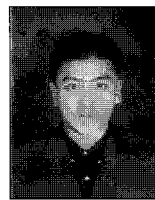
참 고 문 헌

[1] G. M. Masters, "Renewable and Efficient Electric Power Systems", Wiley-Interscience, pp. 169-230, 2004.
 [2] J. Larminie and A. Dicks, "Fuel Cell Systems Explained Second Edition", Wiley, pp. 187-206, 2003.
 [3] G. Hoogers, "Fuel Cell Technology Handbook", CRC Press, pp. 8-1 - 8-30, 2003.
 [4] KEPRI, "Standardization and Infrastructure Establishment for New Energy Sources Interconnection to the Electric Power Distribution Systems", KEPRI, Dec. pp. 49-53, 2000.
 [5] G. Rothwell and T. Gomez, "Electricity Economics", Wiley-Interscience, pp. 101-128, 2003.
 [6] H. W. Fox, and R. Roberts, Fuel Cells .
 [7] M. A. Laughton, "Fuel Cells" Engineering Science and Education Journal, pp. 7-16, Feb. 2002
 [8] M. A. Laughton, "Fuel Cells" Power Engineering Journal, pp. 37-47, Feb. 2002
 [9] John H. Hirschenhofer, "Fuel Cell Status: 1996" IEEE AES System Magazine, pp. 23-28, Mar. 1997
 [10] Bernd Kohlstruck, and Alstom Ballard GmbH, "Applications with Proton Exchange Membrane(PEM) Fuel Cells for a Deregulated Market Place," CIREL., no.482, Jun. 2001.
 [11] Sheldon S. Williamson, Ali Emadi, and Mohammad Shahidehpour, "Distributed Fuel Cell Generation in Restructured Power Systems,," pp. 1-6
 [12] Y. Zoka, H. Sasaki, J. Kubokawa, R. Yokoyama,

and H. Tanaka, "An Optimal Deployment of Fuel Cells Distribution Systems by Using Genetic Algorithms," IEEE . pp. 479-484, 1995.

[13] F. Katiraei, "Micro-grid autonomous operation during and subsequent to islanding process", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 20, No. 1, pp. 248-257, Jan. 2005
 [14] M. Y. El-Sharkh, "A Study of Cost-Optimized Operation of a Grid-Parallel PEM Fuel Cell Power Plant", IEEE Trans. on Power System, Vol 21. No 3. pp. 1104-1114, August 2006.

저 자 소 개



이 주 원 (李柱元)

1979년 1월 7일생. 2005년 건국대 공대 전기공학과 졸업. 2007년 건국대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 건국대학교 대학원 전기공학과 박사과정.
 Tel : 02-458-4778, Fax : 02-444-4179
 E-mail : johnlee@konkuk.ac.kr



박 종 배 (朴宗培)

1963년 11월 24일생. 1987년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 건국대학교 공과대학 전기공학과 부교수.
 Tel : 02-450-3483, Fax : 02-444-1418
 E-mail : jbaepark@konkuk.ac.kr



김 수 덕 (金秀德)

1962년생, 1984년 서울대 사회과학대 경제학과 졸업. 1993년 Rutgers, the State Univ. of New Jersey at New Brunswick, 경제학박사. 현재 아주대학교 대학원 에너지학과 부교수
 Tel : 031-219-2689, Fax : 031-219-2969
 E-mail : suduk@ajou.ac.kr



김 창 섭 (金昌燮)

1962년생, 1984년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 경원대학교 공과대학 전기공학과 부교수.
 Tel : 02-3443-8098
 E-mail : cskim407@kyungwon.ac.kr