

PSCAD/EMTDC를 이용한 열병합발전의 열전비 특성 구현

변길성*, 오세승*, 한중훈*, 장길수*, 홍준희**
*고려대학교, **경원대학교

Modeling of power and heat ratio in the cogeneration system using the PSCAD/EMTDC

Gilsung Byeon*, Seaseung Oh*, Jong Hoon Han*, Gilsoo Jang*, Jun-hee Hong**
*Korea University, **Kyungwon University

Abstract - 최근 분산전원의 한 형태로서 주목받고 있는 열병합발전은 전기와 열을 함께 생산하여 에너지의 이용효율을 높이는 발전방식이며, 이를 위해 시스템의 형태와 각 구성요소를 효율적, 경제적으로 구성하여야 한다. 시간에 따른 열 및 전력수요의 패턴이 변화하므로 생산하는 전기와 열에너지의 비율 즉 열전비를 동적으로 표현할 수 있는 모델이 필요하다. 본 논문에서는 열병합발전의 열전비 특성을 효과적으로 구현하기 위한 방법을 발전기의 출력특성과 관련하여 연구하고, PSCAD/EMTDC를 이용하여 구현하고자 한다.

엔진, 디젤엔진 열병합시스템의 일반적인 열전비와 주요특성이 다음의 표에 나타나 있다 [1].

〈표 1〉 열병합발전 원동기별 주요특성 및 열전비

	가스터빈	가스엔진	디젤엔진
규모	500~10만kW	20~1만kW	200~1만kW
발전효율	20~30%	25~35%	25~40%
열전비	2.2~3.0	1.2~2.2	1.1~1.9
특징	시동이빠름 열추종방식	소형화 지향 전기추종방식	연료소비적음 전기추종방식

1. 서 론

열병합 시스템(Cogeneration System)은 하나의 에너지원으로부터 전력과 열을 동시에 발생시키는 종합에너지 시스템으로 발전에 수반하여 발생하는 배열을 회수하여 사용하기 때문에 에너지의 열이용효율이 높아지므로 산업체, 민생용 건축물 등의 전력 및 열원으로 주목받고 있다. 즉, 열병합 발전 시스템은 산업체, 건축물 등에서 필요한 열, 전기에너지를 보일러 가동 및 한전 수전에 의존하지 않고 자체 발전시설을 이용하여 일차적으로 전력을 생산한 후 배출되는 열을 회수하여 이용하므로 기존의 발전방식보다 30~40%의 에너지 절약 효과를 거둘 수 있는 고효율 에너지 이용기술이다. 또한 열병합시스템은 상황에 따라 한전과 같은 기존 AC시스템과 연계 운전하여 안정한 운영을 가능하게 한다. 열병합시스템의 운전방식은 크게 전기추종방식과 열추종방식으로 나눌 수 있다. 전기추종방식은 전력부하에 맞도록 발전을 하고 배열은 이용 가능한 만큼만 사용하고 남은 열은 방열하는 방식이고 열추종방식은 열부하에 맞추어 배열을 이용하는 만큼만 발전하는 방식이다. 하지만 열추종방식은 부하 예측과 제어가 어려워 실제로 채택되고 있는 방식은 전기추종방식이 대부분이다. 전기추종방식의 경우 전기에너지에 비해 열에너지의 방열량이 많기 때문에 열을 어떻게 효과적으로 이용할 수 있을지가 열병합발전 운영의 주요 포인트가 된다. 따라서 해당지역의 부하특성을 잘 파악하여 그에 따른 열전비와 그 열전비에 유리한 열병합발전 원동기를 선택하는 것이 중요하다. 최적의 운영계획수립을 위한 시뮬레이션을 위해서는 열전비의 전기적 모델링이 필수 수반되어야 하는데 열전비를 전기적인 특성으로 표현하는 방법은 운영방식과 계통특성에 따라 매우 다양하다. 하지만 본 논문에서는 전기추종방식과 열추종방식 모두 적용가능하고 계통의 특수한 상황 하에서도 열전비를 표현할 수 있도록 발전기출력을 이용한 열전비특성을 구현하였다. 시뮬레이션은 PSCAD/EMTDC를 이용하여 진행하였다.

2. 본 론

2.1 열전비

열전비란 열과 전기를 동시에 생산하는 집단에너지 발전시설(열병합 발전시스템)에서의 열 생산용량에 대한 전력 생산용량의 비를 말하며, 집단에너지사업법(07년 5월 현재)에서는 열과 전기를 동시에 생산하는 시설의 열생산용량이 전기 생산용량보다 커야만(열전비 1이상) 집단에너지 발전시설로 규정하고 있다. 열전비의 산출 식은 아래와 같다.

$$\text{열전비} = \frac{\text{열연료소비량}}{\text{전력연료소비량}} \quad (1)$$

열전비는 운영관점에서 해당 공급지역의 전력부하 대 열부하 비율과 비슷한 것이 경제적인 측면에서 유리하나, 공급열은 전력과 달리 따로 구입할 수 없으므로 열부하의 수요를 먼저 충족하고 한전계통과 연계 운전하여 계통을 운영하는 방식(열추종방식)도 열공급이 여유롭지 않은 상황이라면 채택가능하다. 따라서 해당지역의 전력부하 및 열부하 분포 특성을 정확히 파악하고 그에 맞는 발전시스템을 구성하는 것이 매우 중요하다. 우리나라 열병합발전 원동기의 주류를 이루는 가스터빈, 가스

2.2 열전비 모델링을 위한 가정

열전비는 전기와 열을 발생시키는데 사용되는 연료소모량을 가지고 산정하기 때문에 열전비의 모델링을 위해서는 발전기의 출력과 연료소모량과의 관계를 먼저 분석하는 것이 필요하다. 발전기의 출력과 기계적인 토크와의 관계는 다음과 같다 [2].

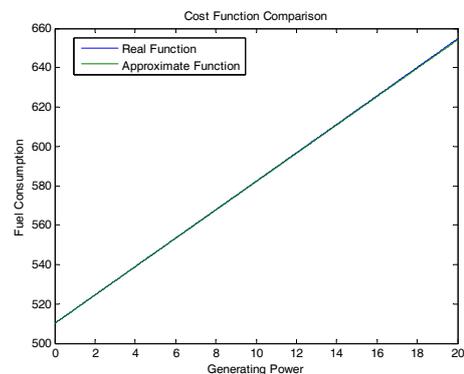
$$\dot{w} = T_m - Dw - (I_d E_d + I_q E_q) \quad (2)$$

정상상태에서 w 의 변화가 없다고 할 때, 기계적 토크는 발전기 출력과 비례하다. 또한 발전기 출력과 연료소모량의 관계는 식(3)에 의하여 계산되어진다. F 는 연료소모량, P 는 발전량(MW)이다 [3].

$$F = \alpha + \beta P + \gamma P^2 \quad (\text{Cost Function}) \quad (3)$$

일반적인 Cost Function에서 상수 γ 가 α, β 보다 매우 작고, 열병합발전의 발전특성을 고려할 때, 발전량 P 가 일반적인 발전기(화력, 수력, 원자력)들에 비해 작으므로 식(3)은 식(4)과 같이 근사할 수 있다.

$$F \approx \alpha + \beta P \quad (4)$$



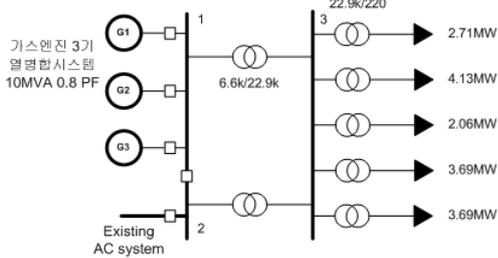
〈그림 1〉 실제 Cost Function과 근사식의 비교

예를 들어 $F = 510 + 7.2P + 0.00142P^2$ 로 가정하고 P 를 0~20MW라고 가정했을 경우, F 를 실제 Cost Function을 이용하여 구한 값과 근사적으로 구한 값의 비교가 그림 1에 나타나 있다. 그림에서 보듯이 거의 일치함을 알 수 있다. 따라서 열병합발전 발전기의 기계적인 토크는 연료소모량과 비례한다고 가정할 수 있다. 또한 열전비가 연료소비량을 기준으로 산정되므로 열공급량 및 수요량도 기계적인 토크

와 같은 차원에서 변환시켜 생각할 수 있다. 계통의 전력수급이 평형을 이루는 상황에서 열은 열수요량을 만족시키는 범위 안에서 전력과 무관하다. 서로 영향을 주는 상황은 전력수요가 줄어 동기화를 위해 발전기의 출력이 줄고 열전비가 최대인 상태에서 열공급량이 기존 열수요량보다 작아지는 경우와 열수요량이 갑자기 증가해 열전비가 최대인 상태에서 열공급량을 넘어서는 경우와 발전기의 출력이 열수급을 맞추기 위해 어쩔 수 없이 증가하는 상황이다. 이런 상황들을 효과적으로 구현하기 위해 열을 발전기의 기계적인 토크와 연관시켜 모델링하였다. 열을 전기적인 표현하는 다른 방법 중 하나는 열을 전력부하형태로 표현하여 계통에 추가하는 것이다. 하지만 가변열전비가 아닌 고정열전비를 유지하는 열병합시스템을 모델링하기 위해선 전력부하의 변동에 맞춰 열부하량을 변화시켜야 하고 열공급량이 열수요량보다 많을 경우 방열량을 쉽게 표현, 측정하기도 어렵다. 또한 계통에 위치한 열부하는 다른 전력부하들과 함께 계통에 다른 영향을 일으킬 가능성이 있다. 더불어 열이 쉽게 손실된다는 특성 때문에 수요자단계에서 구현하는 열부하로는 생산하는 열공급량을 올바르게 표현할 수 없다. 그에 비해 발전기의 기계적 토크를 이용하여 열전비를 구현하는 방법은 열공급량과 열수요량을 그래프화하여 양자 간의 비교가 쉽고 방열량에 대한 표현과 인식이 용이하다. 또한 이를 이용하여 경제적인 접근이 가능하게 되고, 고정열전비와 가변열전비특성을 정확히 구현할 수 있을 뿐만 아니라 열수요량이 변화하더라도 열공급량이 많은 상황 하에서는 계통의 전기적인 영향을 전혀 주지 않는다는 장점이 있다.

2.3 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 결과 및 분석

시뮬레이션 분석에 사용된 계통은 그림 2에 나타나 있는 가스엔진 3대와 5개의 부하를 가진 계통이다. 가스엔진은 모두 동일한 발전기이며 열전비는 1.2~2.2 사이의 값을 가지고, 정격출력은 10549kVA, PF는 0.8이다. 모의계통은 기존 AC시스템과 연계운전을 할 수 있도록 구성되어 비정상적인 상황발생시 피해를 줄일 수 있도록 디자인 되었다. 열의 전기적인 표현과 열전비에 대한 자세한 관찰을 위해 운전방식은 전력수요를 충족한 상황에서 열수요가 변화하는 방식(열중방식)을 선택했다.



〈그림 2〉 사례연구에 사용된 시험 계통

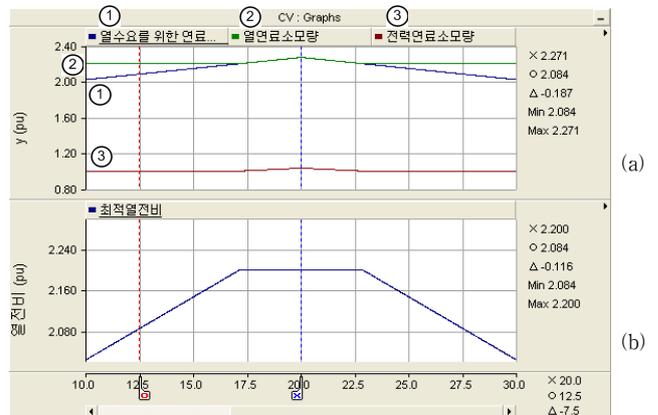
전력연료소모량을 $I_{p.u.}$ 로 가정하고 열부하량(열수요를 위한 연료소모량)은 신호입력으로, 열공급량(열연료소모량)은 전력소모연료량에 열전비를 적용하여 구현하였다. 시뮬레이션은 0초부터 20초까지 열수요량이 꾸준히 증가하여 가스엔진의 열전비가 최대인 상태에서 열수요량이 열공급량을 넘어서는 시나리오를 가정하였다. 그림 3의 그래프 (a)를 보면 전력수급이 평형을 이룬 정상상태에서 열부하량은 계속 증가하여 열공급량보다 많아지게 되고 약 5.9초간 이 상황이 지속되다가 열공급량이 다시 열부하량보다 많아지게 된다. 여기서 열공급량과 열부하량의 차이가 방열량이 되는데 전력수요를 충족시킨 상태에서 이 방열량을 최소화(가능하다면 0)로 유지해야 이윤이 극대화된다 [4]. 그래프 (b)는 열전비를 열수요에 따라 변화시킬 수 있다고 가정할 경우, 경제적으로 최적인 열전비를 나타내고 있다. 이 그래프와 같이 열전비를 시간대별로 변화시킬 수 있다면 방열량은 항상 0이 되게 할 수 있다. 앞의 가정에 따르면, 이 가스엔진의 열전비는 최대치 2.2에서 더 이상 상승시킬 수 없기 때문에 열전비 최대치 2.2로 계속 운전해오던 가스엔진은 열공급량보다 열부하량이 많아지자 어쩔 수 없이 전력공급량을 증가시키게 되고 계통의 안정을 위해 AC시스템은 구역전기시스템으로부터 전력을 흡수하게 된다. 이 현상을 그림 4의 그래프 (b),(c)에서 확인할 수 있다.

3. 결 론

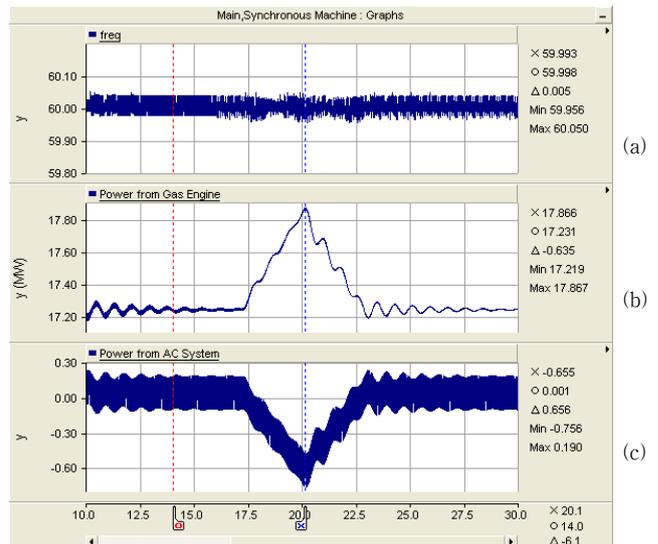
이 논문에서는 열병합시스템의 열전비를 발전기의 기계적 출력과 연관시켜 표현하는 모델링을 제안하고 있다. 열병합발전의 특징을 토대로 연료소모량과 발전기 출력과의 관계를 수식적으로 가정하였으며 열공급량을 열전비에 따라 기계적 토크의 비로 정의하고 열부하(수요)량을 신호화하였다. 따라서 방열량 및 최적열전비를 쉽게 표현, 인식할 수 있게 되었으며 그에 따른 경제적인 분석이 가능해졌고, 원동기 선택에 있어 최적의 선택을 할 수 있을 뿐만 아니라 운영계획을 수립함에 있어서도

보다 정확한 접근이 이루어질 수 있게 되었다. 시뮬레이션으로는 열전비가 최대인 상태에서 열부하량이 열공급량을 초과하는 상황을 가정하여 열병합발전시스템의 출력증가로 인한 위험을 병렬운전 중인 AC시스템과 분담하는 경우를 모의하였다.

향후에는 본 연구에서 수행된 결과들과 시뮬레이션기반을 토대로 실제 열부하량 산정 위한 연료소모량을 자동적으로 신호화하는 메커니즘 및 실시간 최적열전비 적용에 대한 심층적인 연구를 진행할 예정이다.



〈그림 3〉 (a) 전력, 열생산, 열수요 연료소모량변화 (b) 열수요변화에 따른 최적 열전비



〈그림 4〉 (a) 전체 계통의 주파수 (b) 가스엔진의 출력(Active Power) (c) AC시스템으로부터 유입되는 전력 (Active Power)

이 논문은 "산업자원부 전력IT기술개발사업(R-2005-1-396-001)"의 지원으로 연구되었음

[참 고 문 헌]

[1] 황광일, "열병합발전시스템 평가기법에 관한 연구 - 건물용도구성에 따른 열전비 특성과 에너지절약효과", 대한건축학회 논문집, 계획계 제 14권 9호, p.135~143, 1998
 [2] P. M. Anderson and A. A. Fouad, "Power System Control and Stability, 2nd Edition", New York: WILEY, p. 83-148, 2002
 [3] Allen J Wood and Bruce F Wollenberg, "Power Generation Operation and Control Second Edition", John Wiley & Son, Inc., p.2 9~78, 1984
 [4] 류승현, "가변 열전비를 가진 열병합발전시스템의 효과적인 단기운전 계획 수립", 대한전기학회, 43-9, p.1401~1411, 1994