다기능 열병합발전의 기술과 경제성

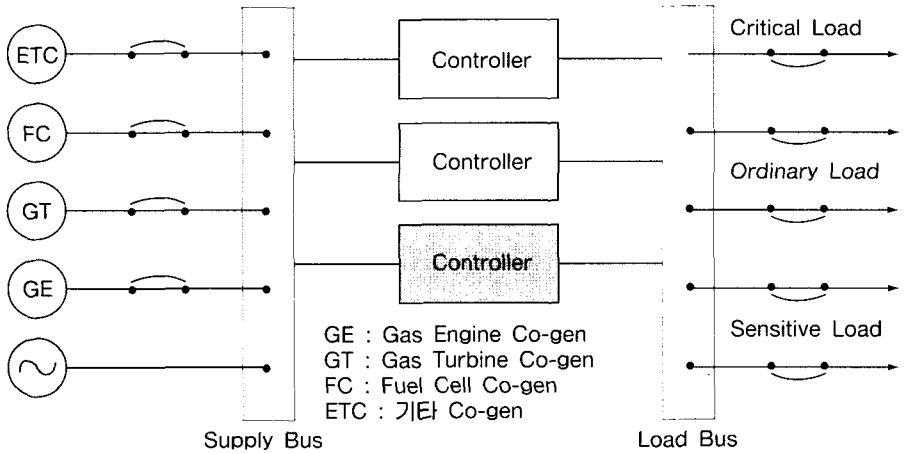
계통연계운전의 정상시에는 소내부하에 전력공급 및 전력거래가 가능하고, 비정상시에는 전력품질보상이 가능함과 동시에 비상시에는 단독운전상태에서 소내부하에 전력을 공급할 수 있는 다기능의 열병합발전기술을 소개한다.

김 재 언
충북대학교 공과대학 전기전자컴퓨터공학부(jekim@chungbuk.ac.kr)

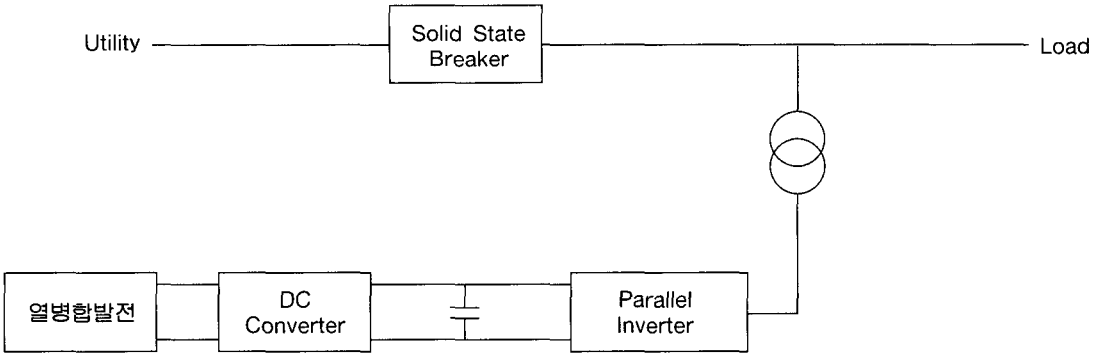
다기능 열병합발전의 개념

열병합발전시스템에 의한 단순전력공급 및 전력거래만으로는 경제성을 확보하기 어렵기 때문에, 수용가 및 전력회사가 고유적으로 안고 있는 전력품질문제(Voltage sags, Voltage swells, Interruptions, Harmonics, Unbalance, Voltage fluctuations, Over voltage, Under voltage, Power factor) 및 전력절감(Peak-shaving, Energy management)문제를 경제적이고 신뢰성 있게 해결할 수 있는 Muti-mode Dispatch 방식의 다기능을 수행할 수 있는 열병합발전시스템의 개념을 소개하고자 한다.

본 시스템의 구성은 **그림 1**에서와 같이 크게 전원공급선(Supply Bus), 전원부분(한전전원 및 열병합발전시스템), 전력공급 제어기(Controller), Load Bus(부하분배기)로 구성될 수 있으며, 이들은 수용가 또는 배전회사의 용도 또는 전력품질(Power Quality) 즉, Ordinary Load(C급: General Level), Sensitive Load(B급: Medium Level), Critical Load(A급: Premium Level)에 따라서 다양한 형태



[그림 1] 다기능 열병합발전시스템의 기본 개념



[그림 2] Solid State breaker 및 전력변환장치에 의한 AC연계구성방식

가 전개될 수 있다. 여기서 특히, 전력공급제어기는 정상상태, 비정상상태, 비상상태의 3가지 운전모드(Multi-mode Dispatch)로 운전되는 데, 먼저 정상상태에서는 피크커트에 의한 계약전력삭감(Peak-shaving), 역조류발생에 의한 전력시장과의 전력거래(Energy management), 무효전력보상(Reactive Power Compensation), 고조파보상(Harmonics Compensation), 3상불평형보상(Unbalance Compensation), 전압조정(Voltage Regulation: Voltage Fluctuation, Over voltage, Under voltage) 등의 기능을, 비정상상태에서는 순간전압저하(Voltage sags) 보상, 순간전압상승(Voltage swells) 보상, 순간정전(Interruptions) 보상 등의 기능을, 비상상태에서는 장기정전 보상 과 같은 기능들을 수행할 수 있는 기능을 갖고 있다. 또한 설치운용되는 위치는 전압레벨에 따라서 분류될 수 있는 데, 우리나라의 경우는 22.9kV 특고압선로급과 380/220V의 저압배전선로급으로 구분될 수 있다.

다기능 열병합발전시스템의 주요기능 중의 하나가 전력품질문제에 대한 해결 즉, 전력품질보상으로서 이에 경쟁될 수 있는 상대로서는 기존의 Active Filter, 전압조정기, 무효전력보상기, UPS등 이 있는데, 이 중에서도 UPS가 가장 강력한 경쟁상대가 될 수 있다. 이 UPS는 여러 가지 형태로 그 기능이 향상되어 현재까지 발전/개발되어 왔지만, UPS 입력단의 고조파 문제, 축전지의 유지관리, 동작의 신뢰성 및 경제성, 에너지절약 등에서 아직까지 해결되지 않는 여러 가지 문제점들을 안고 있다.

다기능 열병합발전시스템의 기본 구조

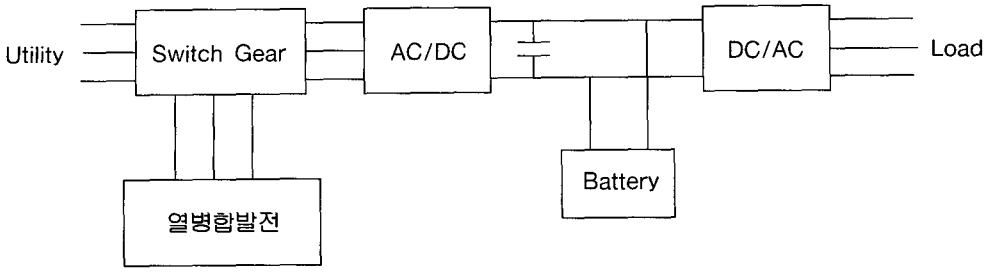
다기능 열병합발전시스템이 갖추어야 할 기본 조건으로서는

- 수용가가 원하는 전력품질의 레벨의 전력공급이 가능할 것.
- 수용가가 원하는 형태로 전력관리가 가능할 것.
- 전력계통과 원만한 운용협조가 가능할 것.
- 전력회사와의 전력거래가 가능할 것.

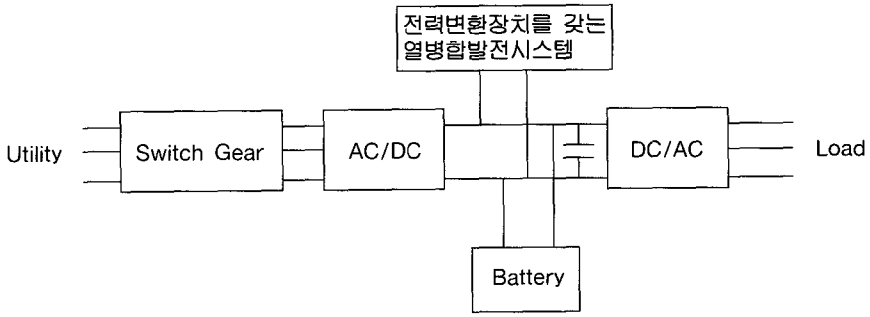
등으로 요약될 수 있다. 따라서, 이를 만족시킬 수 있는 기본 구조로서는 열병합발전시스템(GE, GT, Micro-Gen., FC 등), 전력품질보상기기(Dynamic Voltage Restorer: DVR, 무효전력조정장치: STATCOM, 고속차단기: Solid State Breaker 등)에 의해 구성되는 다음의 여러 가지 형태가 고려될 수 있다.

Solid State Breaker 및 전력변환장치에 의한 AC연계구성방식

그림 2의 다기능 열병합발전시스템의 구성방식은 계통으로부터의 전력품질상의 어떤 왜란이 발생하였을 경우 고속으로 계통으로 부터의 전력공급을 차단하고 자체의 발전기로부터 전력을 공급하는 형태로 구성되어 있다. 또한, 수용가의 전력관리를 열병합발전기의 운전방식을 전환함으로 인해 Peak-shaving 및 정출력운전 등을 수행할 수 있다. 문제는 Solid



[그림 3] UPS와 AC 연계구성방식



[그림 4] UPS와 DC연계구성방식

State Breaker의 고속차단시 열병합발전기의 응동특성에 따라서 수용가의 부하에 문제없는 정도의 전력품질을 유지시켜줄 수 있는가가 관건이다.

UPS와 AC 연계구성방식

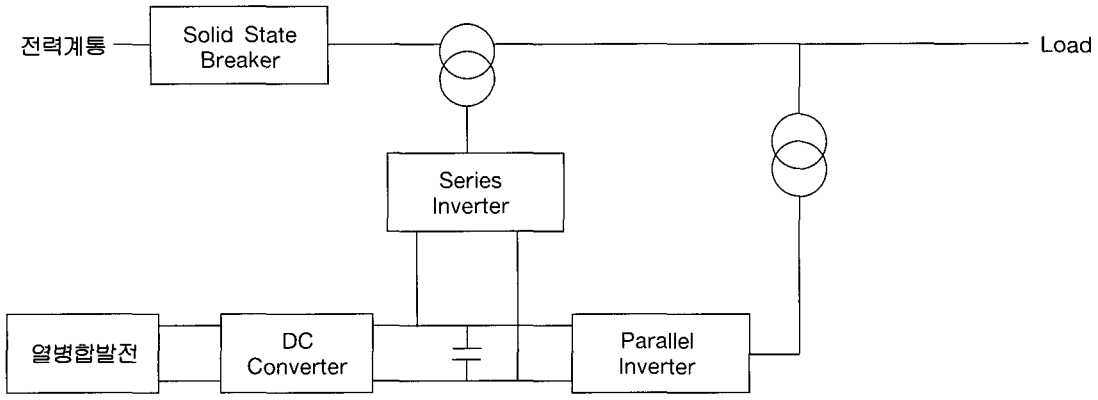
그림 3의 다기능 열병합발전시스템은 열병합발전기와 UPS에 의하여 운용되는 구성방식으로서 기존 UPS의 축전지의 대부분 용량을 열병합발전기으로 대신함으로써 축전지의 유지보수, 신뢰성 및 경제성측면에서의 단점을 보완한 형태이다. 축전지의 적정용량산정이 가장 중요한 문제이다.

UPS와 DC 연계구성방식

그림 4의 다기능 열병합발전시스템은 **그림 3**의 UPS와 열병합발전기에 의한 구성방식과 동일하나, 열병합발전시스템의 출력을 AC/DC 컨버터에 연결하고, 이를 UPS의 직류Bus에 연결하는 것이 다르다. 이 방식에 있어서 전력회사에 전력판매를 하기 위해서는 UPS 입력단의 인버터가 양방향이어야 할 필요가 있다. 이 방식 역시 축전지의 대부분의 용량을 AC/DC 컨버터에 연결되어 있는 열병합발전기가 대신하는 형태로 축전지의 적정용량산정이 주요한 과제이다.

직병렬인버터와 DC연계구성방식

그림 5의 다기능 열병합발전시스템의 구성방식은 정상상태에서는 병렬인버터(Parallel Inverter)에 의해 열병합발전시스템으로부터 발전된 전력을 계통 및 구내부하에 공급하되 출력조정(Peak-shaving 및 정출력운전), 역률보상, 고조파보상의 기능을 수행하도록 하고, 비정상상태에서는 계통으로부터의 전력품질상 발생된 순시전압저하 및 상승, 순간정전에 대하여 직렬인버터(Series Inverter)에 의하여 보상기능이 수행되도록 하고, 또한, 비상상태시에 Solid State Breaker의 고속차단으로 전력계통과는 분리하면서 구내부하만에 전력을 공급하는 단독운전기능을 수행하도록 되어 있다.



[그림 5] 직병렬인버터와 DC연계구성방식

다기능 열병합발전시스템의 운전제어방식

기본동작특성

다기능 열병합발전시스템의 기본동작특성은 다음과 같다.

- 제어대상 : MT, Switch gear, 컨버터/인버터
- Switch gear의 차단과 연계운전에서 단독운전으로의 전환이 수싸이클 이내.
- Switch gear의 투입과 단독운전에서 연계운전으로의 전환이 수싸이클 이내.
- 정상상태시 : 정출력 or 피크커트, 정역률, 정전압, 불평형보상, 고조파보상, 무효전력보상
- 비정상상태시 : Voltage Sag/Swell, 순간정전(Interruption)보상.
- 비상시 : 장시간 정전보상
- 기존 배전계통(배전 자동화 설비, CB, R, S, Fuse)과의 보호협조.
- 기존 배전계통과의 연계조건만족(전기품질, 보호협조, 안전성)
- 배전계통의 전압협조조정 : 무효전력제어.

운전제어방식

운전제어방식으로서는 크게 하기와 같이 정상상태, 비정상상태(전력품질문제발생시), 비상상태(장시간정전) 및 복원시로 나뉘어 다음과 같은 제어기능을 만족시켜 주어야 한다.

1) 정상상태시(Steady State : 1분 이상)

정상상태에서는 피크커트에 의한 계약전력삭감(Peak-shaving), 역조류발생에 의한 전력시장과의 전력거래(Energy management), 무효전력보상(Reactive Power Compensation), 고조파보상(Harmonics Compensation), 3상불평형보상(Unbalance Compensation), 전압조정(Voltage Regulation: Voltage Fluctuation, Over voltage, Under voltage) 등의 기능들이 수행되어야 하므로, 이를 만족시키기 위하여서는 하기와 같은 기능에 제어될 수 있어야 한다.

- 운전모드 : 전력계통과의 연계운전모드
- 출력형태 : 정출력운전, Peak Shaving운전
- 역률제어 : 연계점에서의 역률을 지상 0.9에서 진상 0.9까지 조정가능
- 전압조정 : 정전압제어, 3상의 경우 3상불평형보상
- 고조파보상: 전류 고조파 보상

2) 비정상상태시

비정상상태에서는 순간전압저하(Voltage sags), 순간전압상승(Voltage swells) 및 순간정전(Interruptions) 발생시 이에 대한 전압보상을 하든가 아니면 이와 같은 전력품질저하현상이 발생된 전력계통을 1/2 싸이클내로 끊고, 자체적으로 단독운전상태로 전환하여 운전하던가 해야 한다.

- 순시전압저하(Voltage Sag) 보상 :
  정격전압의 10~90%정도에 해당하는 전압크기가 0.5cycle - 0.2초정도 지속되는 순시전압저하 발생직후 0.5cycle이내 동작.
- 순간전압상승(Voltage Swell) 보상 :
  정격전압의 110~120%정도에 해당하는 전압크기가 0.5cycle - 0.2초정도 지속되는 순시전압저하 발생직후 0.5cycle이내 동작.
- 순간정전(Interruption) :
  정격전압의 0~10%정도에 해당하는 전압크기가 0.5cycle - 2초정도 지속되는 순시전압저하 발생직후 0.5cycle이내 동작.

3) 비상상태 및 계통복원시

비상상태에서는 정격전압의 0~10%정도에 해당하는 전압크기가 2초 이상 지속되는 경우에 대하여 발생직후 0.5cycle이내 동작하도록 해야 한다. 그리고, 계통이 다시 정상상태로 복귀되었을 경우, 연계점에서 전원측 전압을 체킹하여 차단기(Solid State Breaker)를 동기투입하도록 하여야 한다.

다기능 열병합발전시스템의 경제성

본 절에서는 마이크로가스터어빈 또는 가스엔진과 같이 가스에 의한 소형 열병합발전시스템의 모 건물에 대한 경제성 검토 예를 소개하기로 한다.

소형 가스열병합 발전시스템의 고정비용

비용측면을 살펴보면 소형 가스열병합 발전시스템가격은 Western Machinary Electric사의 가격인 675$/kW를 기준으로 하였으며 환율은 1200원/$로 산정하면 810,000원/kW의 가격이 된다. 시스템의 수명을 15년, 연이율 10%로 추정하면, 이자율을 고려한 설비 비용에 대한 매년 고정비용을 환산할 수 있다.

$$\chi \times \frac{(1+0.1)^{15}-1}{(1+0.1)-1} = 810{,}000 \times (1+0.1)^{15}$$

따라서, 1kW당 매년 131,824원을 고정비용으로 볼 수 있다.

발전비용

표 1은 소형 가스열병합 발전시스템의 효율을 30%라고 하고 사용되는 연료를 도시가스라고 가정하면, 일반적인 도시가스의 발열량은 10,500kcal/㎥ 이므로, 1 kWh 의 전기를 발전하는데 필요한 가스량은 0.2724㎥/kWh이 된다. 여기서 가스요금은 열병합 및 집단 에너지용 가스요금으로 산정하였다.

전기요금

표 2는 2000년도에 검토대상 건물에서 사용한 전기량을 나타내고 있다. 대상건물의 전기요금종류는 계약전력이 3000kW 미만일 때 적용되는 일반용 갑으로 하였으며, 전기등급은 고압A(3.3~66kV)로 계약전력은 100kW로 산정 하였다.

피크부하 절감에 따른 공적보상

부하가 집중되는 7,8월에 마이크로 터빈을 운영할 경우 발전, 송전, 배전 설비비를 회피할 수 있는 회피비용이 발생한다. 발전, 송전, 배전의 회피비용은 **표 3**과 같다.

<표 1> 소형가스열병합 발전시스템의 발전비용

월	12	1	2	3	4	5
가스요금(원/㎥)	437.64	437.64	437.64	437.64	437.64	256.02
발전비용(원/kWh)	119.2	119.2	119.2	119.2	119.2	69.7
월	6	7	8	9	10	11
가스요금(원/㎥)	256.02	256.02	256.02	256.02	437.64	437.64
발전비용(원/kWh)	69.7	69.7	69.7	69.7	119.2	119.2

<표 2> 전기요금

월	12	1	2	3	4	5
사용량(kWh)	37948	41899	44958	27318	26778	19578
전기요금(원/kWh)	89.9	88.4	87.4	96.1	90.7	98.5
월	6	7	8	9	10	11
사용량(kWh)	21378	44978	41178	32178	23178	32178
전기요금(원/kWh)	96.1	11.69	118.1	87.1	98.6	91.7

<표 3> 발전, 송전, 배전의 회피 비용

회피발전 설비비용	회피송전 설비비용	회피배전 설비비용	합계
120,982 원 /kW	81,700 원 /kW	14,816 원 /kW	217,498 원 /kW

난방비용

표 4는 평가대상건물에서 연간 사용한 등유사용량과 가격을 월별로 나타내었다.

열병합기능만을 고려한 단순열병합발전시스템의 종합적 경제성 평가

30kW급 소형 가스열병합발전 시스템에 대해서 분석한 경제성을 **표 5, 6**에 제시한다.

표 5, 6에서와 같이 결과적으로 소형 가스열병합발전 시스템 운용시 총비용은 57,589,389원 이며, 회피비용의 편익이 발생하여 공적보상(217,498 원/kW ×30kW = 6,524,940원)이 최대한으로 지원된다고 해도 51,064,449원(57,589,389원 - 6,524,940원)이므로 소형 가스열병합발전 시스템을 운용하지 않았을 때 소요되는 비용 52,373,840 원과 근소함을 볼 수 있다. 이와 같이 한전의 전기요금이 저렴하기 때문에 아직 마이크로 터빈의 경제적인 효과는 미미하다 할 수 있다.

<표 4> 등유사용량과 가격

월	등유사용량(L)	등유가격(원/L)	금액(원)
11	3625	650	2,356,250
12	4894	650	3,278,980
1	5075	650	3,400,250
2	4531	650	3,035,770
계	18,125	-	12,071,250

<표 5> 소형 가스열병합발전 시스템 사용시의 비용

(단위:원)

월	발전비용	전기요금	기기비용	합계
12	1609200	2197875	-	
1	1609200	2510471	-	
2	1609200	2749429	-	
3	-	2625260	-	-
4	-	2428765	-	-
5	940950	598683	-	-
6	940950	757075	-	-
7	940950	3679778	-	-
8	940950	4652671	-	-
9	940950	1626854	-	-
10	-	2285351	-	-
11	1609200	17140807	-	
합계	11,141,550	43,253,019	3,194,820	57,589,389

다기능을 고려한 소형 가스열병합발전시스템의 종합적 경제성 추정평가

여기서는 다기능 항목중에서 전력품질보상에 의한 효과만을 산출하여 이를 앞의 경제성 평가와 비교하여 추정하기로 한다. 먼저, 전력품질보상으로 인한 년간 효과(Benefit)를 산출하면 **표 7**과 같이 추정될 수 있다. 이 자료는 지난 1993년 6월부터 95년 9월까지 EPRI 주관 하에서 전력 품질 모니터링 전문회사인 Electrotek과 공동으로 Duke Power Company 등 24개 전력회사의 배전계통 100개 선로의 277개 Site에서 공급 전력의 품질에 대한 모니터링을 실시

<표 6> 한전에서 공급되는 전기를 사용할 경우의 비용

(단위:원)

월	전기요금	난방비용	합계
12	3411525	3,278,9807	
1	3703872	3,400,250	
2	3929329	3,035,770	
3	2625260	-	-
4	2428765	-	-
5	1928433	-	-
6	2054426	-	-
7	5257928	-	-
8	6922022	-	-
9	2802704	-	-
10	2285351	-	-
11	2952975	2,356,250	
합계	40,302,590	12,071,250	52,373,840

<표 7> 전력품질보상효과(1회 정전비용: $1000,000으로 가정)

Event		Cost Factor	Events /Year	Cost /Year	Expected Reduction	Benefit /Year
Interruption	0%	1	0.1	10,000	0%	
1 or 2 Phase Sags due to Faults on Parallel Feeders	< 50%	0.9	1.5	135,000	20%	27,000
	50~70%	0.6	1.5	90,000	40%	36,000
	70~90%	0.2	18	160,000	40%	64,000
1 or 2 Phase Sags due to Faults on Transmission System	< 50%	0.9	0	0	20%	0
	50~70%	0.6	4	240,000	40%	96,000
	70~90%	0.2	1.5	30,000	40%	12,000
3 Phase Sags due to Faults on Transmission System	< 50%	0.9	0	0	20%	0
	50~70%	0.6	1.6	90,000	40%	63,000
	70~90%	0.2	16	320,000	40%	128,000
Total			34	1,065,000		399,000
	1200 / $ 기준				478,800,000	

$$C_{PQ} = \Sigma\, CostFactor_i \times Events/Yr_i \times ExpectedReduction_i$$

한 결과에 근거한 것이다.

표 7의 경우 5,000 kW 수용가에 대하여 조사된 것으로, 년간 약 4억8천만원 의 보상효과가 나타난 것으로 보고되고 있고, 참고로 우리나라의 경우, 1000 kW 이상 산업용 수용가가 5,075호로서 이들에 대한 순간정전당 피해액은 년간 호당 약 1억원 정도로 조사/보고되고 있다. 따라서, 1000 kW 이상 수용가의 경우를 대상으로 하면, 호당 1억원정도의 비용범위내에서 다기능 보상장치를 갖추게 하면 될 것으로 추정된다. 이 외에도 UPS 설비의 회피비용 및 비상발전기(1997년기준 총용량 약 7,260 MW)의 대체비용도 고려하면 상당한 경제적 효과가 예상된다.