

배전계통에 있어서 열병합 분산형전원의 최적 도입계획에 관한 기초적 연구

심 헌\* · 노대석\* · 최재석\*\*  
 한국기술교육대학교\* 경상대학교\*\*

Optimal Planning for Dispersed Generating Sources in Distribution Systems

Hun Shim\* · Daeseok Rho\* · Jaeseock Choi\*\*  
 Korea University of Technology and Education\* Gyeongsang National University\*\*

**Abstract** - This paper deals with a method for determining an optimal operation strategy of dispersed generating sources considering thermal merits. The optimal operation of these sources can be determined by the principle of equal incremental fuel cost. This paper presents an optimal operation strategy using the Kuhn-Tucker's optimal conditions and also an priority method to decide the optimal location of those sources in power systems. The validity of the proposed algorithms are demonstrated using a model system.

하에 대한 보일러의 운전비용의 총합으로 정식화할 수 있다. 여기서, 보일러는 열병합 시스템을 구성한다는 목적하에 분산형전원의 열출력으로 공급하지 못하는 열부하를 보충하는 것이다.

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

subj.to

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

$$H_{Dj} \leq H_{cj} + H_{Bj} \quad (\text{열공급 제약조건}) \quad (3)$$

$$P_{gimin} \leq P_{gi} \leq P_{gimax} \quad (\text{발전기출력 상하한제약조건}) \quad (4)$$

$$P_{cjin} \leq P_{cj} \leq P_{cjmax} \quad (\text{분산형전원 상하한제약조건}) \quad (5)$$

$$H_{Bj} \geq 0 \quad (\text{보일러 열출력제약조건}) \quad (6)$$

1. 서 론

최근 전력계통에서 부하율의 악화로 인하여 설비 이용률의 저하경향이 급진됨에 따라, 새롭고 탄력적인 전기에너지 공급형태의 연구개발이 활발하게 진행되고 있다. 이러한 배경 하에서 열병합 분산형전원(여기서는 연료전지를 대상으로 함)은 다양한 연료를 사용할 수 있고, 수용가 근처에 분산배치 가능하며, 환경보전 면에서도 매우 우수한 특성을 가지고 있으며, 또한 열병합에 따른 고효율 운전이 기대되고 있다.<sup>[1]-[3]</sup> 그러나, 이러한 전원이 무질서하게 도입·운용되는 경우, 전체의 경제성 및 에너지 절약효과를 손상시킬 염려가 있으므로, 효율적인 전력계통을 구성하기 위해서는 계획 단계에서의 배치 및 운용에 관한 검토가 중요한 과제가 된다.

열병합 분산형전원의 최적 도입계획 문제를 고려하기 위해서는, 기존의 전기에너지 공급에 의한 메리트뿐만 아니라, 열에너지의 공급 가치를 어떠한 형태로든 평가하는 것이 필수불가결하다. 따라서, 본 논문에서는 Kuhn-Tucker 정리에 기초하여, 분산형전원의 열 가치를 평가하는 방법을 개발함으로써, 열병합 분산형전원의 최적 배치점과 최적 운용 방안을 결정하는 알고리즘을 제안한다.

2. 열병합을 고려한 최적 운용알고리즘

2.1 최적 운용문제의 정식화

분산형전원의 열공급을 포함한 전력계통의 운용에 대한 총 비용의 최적화 문제는 식 (1)과 같이 각 발전기의 발전비용 및 분산형전원의 운전비용, 열부

2.2 Kuhn-Tucker 정리에 기초한 최적 운용조건

수급 조건하에서 총 연료비를 최소로 하는 문제를 고려하기 위하여, Lagrange 함수를 도입하여 최대 목적함수(L)를 구성하면 다음 식이 성립한다.

$$L = \sum_{i=1}^{NG} f_{gi}(P_{gi}) + \sum_{j=1}^{NG} f_{cj}(P_{cj}) + \sum_{k=1}^{NG} f_{Bj}(H_{Bj}) + \lambda(P_D + P_L - \sum_{i=1}^{NG} P_{gi} - \sum_{j=1}^{NG} P_{cj}) + \mu(-H_{cj} - H_{Bj} + H_{Dj}) \quad (7)$$

상기의 Lagrange함수 L에 대하여, Kuhn-Tucker 의 최적 조건을 적용하면, 최적 해는 다음과 같이 구해진다.

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

$$\lambda \left( 1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{cj}} \right) = \frac{d}{dP_{cj}} (f_{cj} - \mu_j \times H_{cj}) \quad (9)$$

$$0 \leq \mu_i \leq \frac{df_{Bj}}{dH_{Bj}} (= \alpha_i \text{로 함}) \quad (10)$$

식 (8)에서  $f_{gi}$ 와 식 (9)에서  $(f_{cj} - \mu_j \times H_{cj})$ 가 동일한 단위(원/h)를 가지게 되므로, 전력에 대한 비용이라는 차원에서 식 (9)의 ( )안을 "열등가 환

산비용”으로 정의할 수 있다.  $\mu_j$ 는 분산형전원의 운용상태에 있어서 배열의 가치를 나타내고 있으므로, “열등가 환산계수”라고 부르기로 한다.

### 2.3 최적 운용 결정 알고리즘

화력 발전기 및 분산형전원의 연료비 특성은 이차방정식의 형태를 가지고, 전력출력과 열출력은 식 (11)과 같은 선형관계를 가진다고 가정하면, 화력발전기와 분산형전원의 최적 출력은 식 (12), (13)과 같이 결정된다.

$$H_{ci} = d_j P_{ci} + e_j \quad (11)$$

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

$$P_{ci} = \frac{d_j}{2 a_i} \mu_j + \frac{1}{2 a_i} \left\{ \lambda \left( 1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{ci}} \right) - b_i \right\} \quad (13)$$

여기서,  $\mu_j$ 의 값은 식 (10) 과 식 (11), (13)으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\mu_j = \frac{2 a_i}{d_j} \left[ H_{ci} - \frac{d_i}{2 a_i} \left\{ \lambda \left( 1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{ci}} \right) - b_i \right\} + \frac{2 a_i e_i}{d_i} \right] \quad (14)$$

위 식으로부터, 연료전지의 열출력과 열부하,  $\mu_j$ 의 관계는 그림 1과 같이 나타낼수 있다.

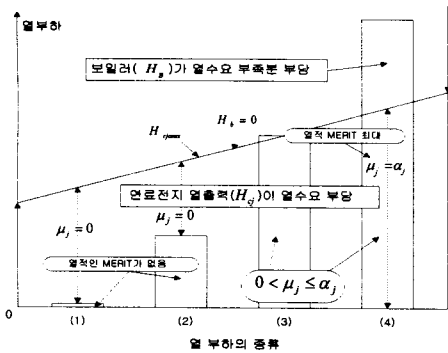


그림 1. 열출력(열부하)과 열등가 환산계수

이상에서 제안한 수법은, 참고문헌 [2]의 전력출력만 상정한 등  $\lambda$ 법을 열에너지도 고려할 수 있도록 확장한 것으로써, 이것을 “확장 등  $\lambda$ 법”이라고 한다. 다른 점은 그림 2에서 열등가 환산계수만 추가되어진 것 뿐이다.

### 3. 열병합을 고려한 최적배치점 결정 수법

열병합을 고려한 최적 도입계획 결정 알고리즘도 참고문헌 [2]의 전력공급 측면에서의 결정수법과 동일하다. 즉, 경제 부하배분에 의하여 총비용(열부하에 대한 비용 포함)을 산정·비교하여 비용이 최소

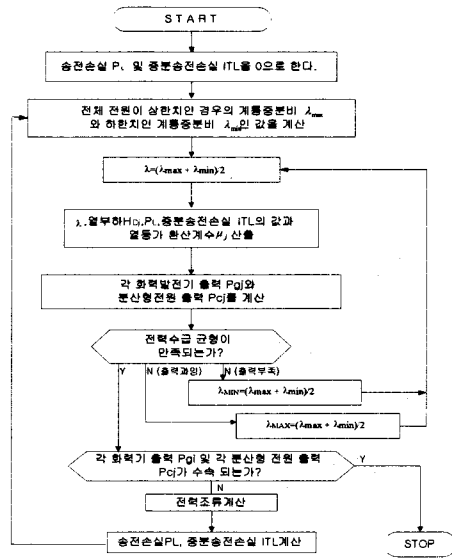


그림 2. 확장 등  $\lambda$ 법에 의한 최적 운용알고리즘

인 모선을 최적 배치점으로 결정하며, 복수대인 경우도 동일한 알고리즘으로 결정한다.

## 4. 모델계통에의 적용

### 4.1 모델계통 데이터

본 연구에서 제안한 분산형전원의 최적 운용과 최적 배치점 결정수법의 유효성을 확인하기 위하여, 3기 6모선 모델계통<sup>[2]</sup>에 적용하였다. 계통의 각 모선과 분산형전원의 데이터는 표 1과 같다. 각 부하 모선의 전력부하와 열부하 패턴은 피크부하의 100, 90, 80, 70(%)인 4개의 시간대만을 고려하였다.

### 4.2 시뮬레이션 결과

먼저, 열병합 분산형전원의 도입효과를 평가하기 위하여, 식 (15)와 같이 도입전·후의 경제성을 나타내는 평가지수를 정의한다. 즉, 평가지수가 가장 큰 부하 모선이 최적 배치점으로 선정된다.

$$\text{평가지수} = \frac{\text{연료전지의 도입에 의하여 절약되는 비용}}{\text{연료전지를 도입하지 않을시의 비용}} \times 100 (\%) \quad (15)$$

전 절에서 제안한 알고리즘을 상기의 모델계통에 적용한 결과는 다음과 같다. 표 2는 분산형전원이 도입된 경우의 조류계산 결과이고, 표 3, 표 4는 우선순위법과 복수 시간대에 도입 메리트를 산정한 결과를 나타냈는데, 두 경우 모두 1번, 2번 모선이 최적 배치점에 대한 후보 모선으로 결정됨을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서 제안한 우선순위법은 실 계통 적용 시에 계산부담의 경감을 기대할 수 있으

므로, 제안수법의 유용성을 확인할 수 있다. 분산형 전원의 열적 메리트를 보일러의 연료비 경감의 측면에서 비교한 것이 표 5와 같다. 또한, 표 6에서는 최적 배치점인 1번 모선에 분산형전원을 도입하는

표 1. 각 모선과 분산형전원의 데이터

모선 조건	BUS NO.	P <sub>max</sub> (P·U)	P <sub>min</sub> (P·U)	열부하/ FC열출력(Mcal)	a	b	c
부하 단	1	-0.5	-	25800	-	-	-
	2	-0.55	-	17200	-	-	-
	3	-0.3	-	8600	-	-	-
발전 단	4	0.9	0.1	-	1.0	1.5	1.0
	5	0.7	0.1	-	1.5	1.0	1.0
	6	1.5	0.1	-	3.0	3.0	3.0
분산형전원		0.2	0.025	17200	0.1	0.1	0.1

표 2. 분산형전원이 도입된 경우의 조류계산 결과

BUS NO.	1	2	3	4	5	6	손실
1번 모선 도입	전압(PU)	1.03	1.02	1.17	1.10	1.10	1.05
	deg.(°)	-3.92	-1.43	2.86	4.16	9.78	0.0
	P(PU)	-0.30	-0.55	-0.30	0.55	0.42	0.24
	Q(PU)	-0.05	-0.11	-0.19	0.50	-0.09	0.10
2번 모선 도입	전압(PU)	1.02	1.01	1.17	1.10	1.10	1.05
	deg.(°)	-5.33	-0.39	3.87	5.17	10.78	0.0
	P(PU)	-0.50	-0.35	-0.30	0.55	0.42	0.24
	Q(PU)	-0.05	-0.11	-0.19	0.51	-0.09	0.12
3번 모선 도입	전압(PU)	1.01	1.00	1.18	1.10	1.10	1.05
	deg.(°)	-5.36	-0.35	8.37	8.83	12.30	0.0
	P(PU)	-0.50	-0.55	-0.10	0.56	0.41	0.24
	Q(PU)	-0.05	-0.11	-0.18	0.47	-0.06	0.16

표 3. 총 연료비 및 도입 우선순위

	발전기	연료 전지	연료비	우선 순위
도입 전	10,526.5500	-	10,526.550	-
1번 모선	7,497.8530	42.1	7,539.9530	1
2번 모선	7,530.8380	42.1	7,572.9380	2
3번 모선	7,700.9000	42.1	7,743.0000	3

표 5. 보일러 연료비의 비교

BUS NO.	우선 순위	도입전 비용	도입후 비용	절약비용
1	1	2580,000.0	860,000.0	1720,000.0
2	1	1720,000.0	0.0	1720,000.0
3	3	860,000.0	0.0	860,000.0

표 4. 복수시간 단면의 각 부하의 총연료비 산정 (단위 : 원)

시간대	부하크기	1번모선	2번 모선	3번 모선
1	100(%)	7,539.9530	7,572.9380	7,743.0000
2	90(%)	5,842.1880	5,864.5950	5,992.3120
3	80(%)	4,381.3150	4,396.8550	4,498.3590
4	70(%)	3,144.0190	3,149.3320	3,223.7330
계		20,907.475	20,983.721	21,457.404

표 6. 평가지수(도입메리트)

BUS NO.	우선 순위	발전기연료비의 절약률	보일러 연료비의 절약률	합 계
1	1	28.37	33.33	61.71
2	2	28.06	33.33	61.39
3	3	26.44	16.67	43.11

경우, 보일러의 연료비를 포함한 총 운용비용이 약 61.7%정도 절약할 수 있음을 확인할 수 있었다.

## 5. 결론

본 논문에서는 열병합 분산형전원의 최적 도입계획 결정수법에 대한 기초적인 검토를 수행하였다. 그 특정 및 시뮬레이션 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) Lagrange 함수와 Kuhn-Tucker조건에 의하여, 열병합 분산형전원의 최적 운용조건식을 유도하였으며, 이에 근거한 최적운용 알고리즘을 제안하였다.

(2) 열병합 분산형전원의 열적인 메리트를 평가하기 위하여 열등가 환산계수를 정의하고 그 값을 이용한 비용계산 수법을 제안하였으며, 보일러의 연료비 경감까지 평가함으로써 포괄적인 최적화 수법을 제안하였다.

(3) 열유효 이용가치의 평가와 피크 시간대만의 파라미터 값을 이용하여 비용을 산정하는 우선 순위법에 의해 후보 모선을 결정함으로써, 실제통계적 용시 계산부담의 경감을 기대할 수 있다.

앞으로는, 열병합 분산형전원의 파라미터와 실규모 계통을 고려할 수 있는 범용적인 최적도입 알고리즘을 확립하고자 한다.

## [참 고 문 헌]

- [1] 다무라 외, "보일러와의 협조를 고려한 열병합 분산형전원의 최적 운용결정 수법", 일본 전기학회논문지B, 114권 12호, 1994년
- [2] 심현 외, "전력공급면에서 열병합 분산형 전원의 최적 도입계획에 관한 연구", 전력계통연구회 춘계학술회 논문집, pp. 104-108, 2000.
- [3] A.J. Wood and Wollenberg : "Power Generation Operation and Control", John Wiley & Sons 1984