

실시간 경제급전 프로그램에서 복합화력 처리 방안

이상호*, 이정호*, 오태규*, 김기운*, 이진수**, 서은성**
 한국전기연구원*, 전력거래소**

Management of Combined Cycle Plant in Real-Time Economic Dispatch

Sang-Ho Lee*, Jeong-Ho Lee*, Tae-Kyoo Oh*, Ki-Woon Kim*, Jin-Soo Lee**, Eun-Seong Seo**
 KERI*, KPX**

Abstract - 본 논문에서는 한국형 통합 에너지관리시스템(K-EMS)용 발전계획 응용프로그램 중에서 경제급전(Economic Dispatch) 프로그램 개발의 상세 내용을 소개한다. 특히 복합화력에서 가스터빈(GT)과 스팀터빈(ST)의 현재출력을 고려하여 등가복합화력으로 변환하여 경제배분에 포함시키는 방안 및 데이터 이상 또는 데이터 미비 처리 방안 등을 소개한다.

1. 서 론

실시간 경제급전 프로그램은 현재 운전 중인 발전기들의 데이터를 실시간으로 취득하여 각 발전기들의 가장 경제적인 목표 발전량을 결정하여 자동발전제어(AGC)로 전달하는 프로그램이다. 실시간 경제급전의 운용 시에는 예기치 못한 데이터 이상이나 데이터 미비 등의 상황이 발생할 수 있기 때문에 이상 상태에서도 적절한 해를 제공할 수 있도록 해야 한다. 이를 위해 모든 입력데이터에 대해 유효성을 체크하고 각 상황에 따라 적절하게 대응하도록 해야한다. 경제급전 프로그램에서는 Lambda-iteration법을 사용하여 최적의 발전배분을 결정하도록 하였는데 알고리즘의 특성 상 제어변수 및 목표값이 전 영역에 걸쳐있지 않은 경우에는 수렴속도가 느린 경우도 발생할 수 있다. 즉, 대상으로 하는 발전기들의 비용곡선이 상대적으로 편차가 큰 경우 Lambda값의 수렴성이 좋지 않은 경우도 발생할 수 있다. 또한 복합화력의 경우는 가스터빈의 출력에 따라 스팀터빈의 출력이 결정되고 스팀터빈은 연료비를 측정할 수 없기 때문에 일반적인 경제배분의 원리에 따라 배분하기 어려운 점이 있다. 본 논문에서는 복합화력에서 복합모드로 운전 중인 GT/ST의 조합과 출력에 따라 등가복합화력을 정의하고 경제배분에 포함시키는 방법 및 이상 상태에서의 처리 방안 등을 소개한다.

2. 본 론

2.1 경제급전의 개요

실시간 경제급전 프로그램의 목적은 각 발전기의 현재출력으로부터 Ramp-rate 범위 내에서 최소의 발전비용을 목적으로 발전출력을 재배분하는 것이다.[1][3] 경제급전 대상부하는 현재 발전기들의 전체 출력 합으로 대체하며 여기에서 미취득 발전량을 제한한다. 경제배분의 기본 알고리즘으로는 Lambda-iteration법을 채용하였으며 육지, 제주부하를 통합배분한 후 HVDC 조류량을 체크하고 HVDC 한계치를 넘어가는 경우에는 HVDC 한계치만큼 육지/제주 발전력을 조정한 후 각기 재배분하도록 하였다. 실시간 경제급전에는 CED, EED, AED의 3개 모듈이 있으며 CED는 실시간 경제배분, EED는 제안경제급전, AED는 선형경제급전을 뜻한다. CED는 현재 경제급전 대상 발전기들에 대한 최적배분을 수행하고 EED는 가동 중인 모든 발전기를 대상으로 최적배분을 수행하며 AED는 미래 지정된 예측부하에 대해 최적배분을 수행하도록 한다.

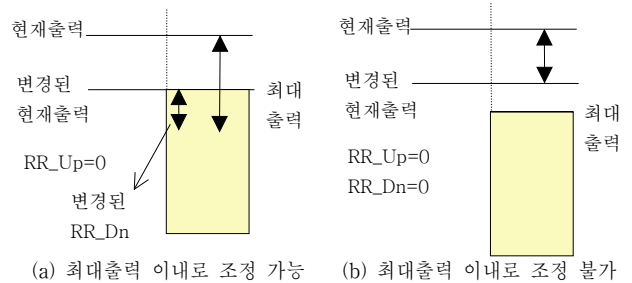
2.1.1 경제배분 대상 발전기의 선택

경제배분 알고리즘에서 대상으로 선택되는 발전기는 각 모듈별로 다르며 CED의 경우는 현재 가동상태이고 제어모드가 Auto, Remote, CED모드로 지정된 발전기를 대상으로 한다. EED 및 AED에서는 현재 가동 중인 모든 발전기를 대상으로 한다. 실시간 경제배분 프로그램에서는 대상 발전기들의 현재출력 및 Ramp-rate를 고려하여 최대도 조정할 수 있는 범위를 계산하고 목표부하값이 이 범위보다 큰 경우는 모든 발전기 출력을 가능한 한 최대도 결정하며 목표부하값이 이 범위보다 작은 경우에는 모든 발전기 출력을 가능한 한 최소로 결정하고 알람을 발생시킨 후 종료하게 된다.

2.1.2 현재출력값이 제한범위 밖인 경우

화력기 상향운전 등과 같이 현재출력값이 발전기 출력 제한범위 밖에 있는 경우는 다음과 같이 처리한다. 현재출력값이 제한범위 밖에 있더라도 고정출력 모드로 운전 중이면 경제배분 대상에서 제외되며 현재출력을 유지하도록 한다. 경제배분 대상 발전기로 지정된 경우는 원칙적으로

제한범위 내로 조정하도록 한다. 이 경우 그림 1의 (a)와 같이 최대 Ramp-rate만큼 조정했을 때 제한범위 내로 조정가능한 경우는 현재출력을 최대/최소값으로 지정하고 이동한 만큼 Ramp-rate도 조정해주면 된다. 만일 그림 1의 (b)와 같이 최대 Ramp-rate만큼 조정해도 제한범위 내로 조정할 수 없는 경우는 최대 Ramp-rate만큼 이동한 값을 현재출력으로 지정하고 Ramp-rate를 모두 0으로 변경하여 더 이상 조정할 수 없도록 처리한다.



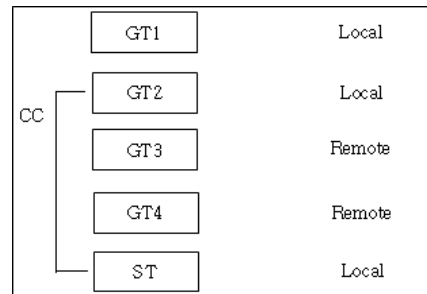
<그림 1> 현재출력값이 제한범위 밖인 경우 처리

2.1.3 순동예비력 부족 시 재조정

경제배분 후 순동예비력 요구량을 만족하는 지 체크한 후 예비력이 부족한 경우에는 발전력을 재조정하여 예비력을 확보하도록 하였으며 재조정 원칙은 다음과 같다. 부족한 예비력을 확보하기 위하여 경제배분 알고리즘에서 결정된 Lambda값보다 싼 발전기의 출력을 감소시켜 예비력을 확보하도록 하였으며 감소된 출력만큼 Lambda보다 비싼 발전기의 출력을 증가시켜서 수급균형을 유지하도록 하였다. 위의 과정을 발전력 재조정을 통하여 예비력이 확보되었거나 더 이상 출력을 증가시킬 발전기가 없는 때까지 반복하도록 한다.

2.2 등가복합화력의 정의

현재 국내의 복합화력 발전소에는 여러 기의 GT와 ST가 복합 또는 단독 모드로 운전 중이며 ST의 출력은 GT의 현재 출력 및 GT/ST의 조합에 영향을 받는다. 복합화력의 출력 및 효율은 GT/ST의 조합에 따라 영향을 받기 때문에 각 상황에 따라 발전출력에 따른 비용곡선이 달라져야 한다.



<그림 2> 복합화력 발전소의 운전 예

그림 2에 복합화력 발전소의 운전 상태의 예를 들었다. 총 4기의 GT와 1기의 ST가 운전 중이고 GT2*GT4와 ST가 복합 모드로 운전 중이라고 가정하였다. 단, GT1은 단독 모드로 운전 중이며 Local은 현장제어, Remote는 중앙에서 AGC의 제어를 받는 것을 의미한다. 현장제어의 경우 경제배분 대상에서 제외되며 Remote로 설정된 발전기만 경제배분

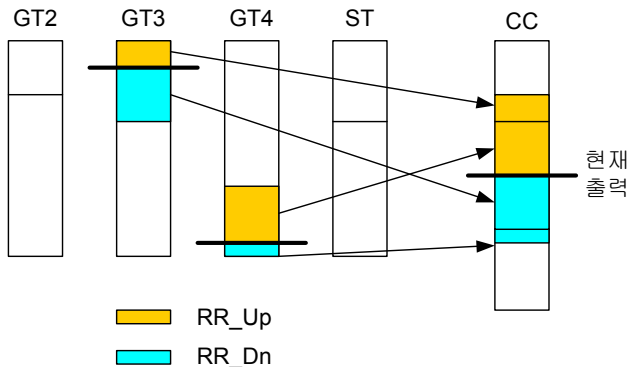
대상발전기에 포함된다. 여기에서 GT2는 AGC의 제어를 받지 않고 있고 GT3와 GT4는 AGC의 제어를 받고 있다고 가정하면 GT2~GT4와 ST를 하나의 등가 복합화력기로 등가할 수 있다. (단, ST의 출력은 GT의 출력에 따라 결정되므로 중앙에서 제어신호를 보낼 수 없다.)

경제급전에서 각 발전기별로 필요한 대표적인 입력값으로는 현재출력, Ramp rate, 최대/최소 출력한계 등이 있다. GT2~GT4와 ST를 하나로 묶은 등가 복합화력기(CC)의 특성값은 다음과 같이 정의할 수 있으며 그림 3과 같이 도식화할 수 있다.

- 등가CC의 현재출력 = (GT2~GT4의 현재출력합) + ST 현재출력
- 등가CC의 최대/최소 출력한계 = GT2의 현재출력 + (GT3~GT4의 최대/최소 출력한계합) + ST현재출력
- 등가CC의 상향 Ramp Rate = (GT3~GT4의 상향가능용량 합) * (1+GT/ST 출력비)
- 등가CC의 하향 Ramp Rate = (GT3~GT4의 하향가능용량 합) * (1+GT/ST 출력비)

단, 각 GT의 상향가능용량(RR_Up)은 GT의 상향 Ramp-rate와 현재 출력에서 최대 출력한계(Gmax)까지 남은 용량 중에서 작은 값으로 결정되며, 각 GT의 하향가능용량(RR_Dn)은 GT의 하향 Ramp-rate와 현재 출력에서 최소 출력한계(Gmin)까지 남은 용량 중에서 작은 값으로 결정된다.

- GT의 RR_Up = min(상향 Ramp-rate, Gmax-현재출력)
- GT의 RR_Dn = min(하향 Ramp-rate, 현재출력-Gmin)



〈그림 3〉 등가복합화력의 특성값 결정

GT/ST의 출력비는 현재 복합모드로 운전 중인 GT들의 출력합과 ST의 출력비를 말하며 Ramp-rate에 이 값을 곱하는 것은 현재출력으로부터 GT들의 출력이 바뀌는 경우 그 비율대로 ST의 출력이 변한다는 가정에서 나온 것이다. 즉, 복합모드로 운전 중인 GT들의 출력합이 100MW이고 ST의 출력이 50MW인 경우 경제배분을 통해 GT들의 출력합이 10MW 변한다고 하면 ST의 출력도 5MW만큼 변한다는 뜻이 된다. 이를 등가CC의 Ramp-rate에 반영하도록 하기 위해 출력비 만큼을 포함시켜주는 것이다.

2.2.1 경제배분 결과로부터 GT 및 ST의 출력 결정

복합화력 발전소를 하나의 등가CC로 등가하여 경제배분을 시행한 결과 등가CC의 목표출력값이 현재출력으로부터 ΔP만큼 이동하는 것으로 결정된 경우 각 GT 및 ST의 최종출력은 다음과 같은 방식으로 결정될 수 있다.

ΔP>0인 경우

- GT3의 목표출력값 = GT3의 현재출력 + ΔP*(GT3의 RR_Up / 등가CC의 RR_Up)
- GT4의 목표출력값 = GT4의 현재출력 + ΔP*(GT4의 RR_Up / 등가CC의 RR_Up)

ΔP>0인 경우

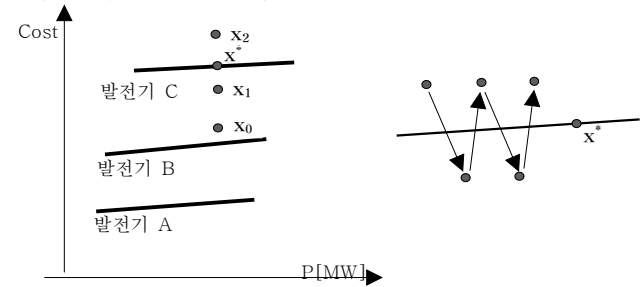
- GT3의 목표출력값 = GT3의 현재출력 + ΔP*(GT3의 RR_Up / 등가CC의 RR_Up)
- GT4의 목표출력값 = GT4의 현재출력 + ΔP*(GT4의 RR_Up / 등가CC의 RR_Up)

ΔP>0인 경우

- GT3, GT4의 목표출력값 = GT3, GT4의 현재출력
- 나머지 GT1, GT2, ST는 현재출력을 유지하도록 하면 된다.
GT의 목표출력값은 현재출력으로부터 전체 등가CC의 상/하향가능용량 중에 자신의 상/하향가능용량 비만큼 움직이도록 하는 것이다. 위와 같은 방식으로 출력을 결정하게 되면 항상 자신의 Ramp-rate 및 출력한계 내에서 목표출력값이 결정된다.

2.3 Lambda-iteration법의 수렴특성 보완

경제배분에서 사용하고 있는 Lambda-iteration법은 iteration을 진행시킴에 따른 에러값의 변화율로부터 해를 추정해가는 방법인데, 대상으로 하는 함수가 불연속 구간이 크고 그 기울기가 너무 작은 경우에는 수렴 속도가 느린 단점이 있다. 예를 들어 그림 4와 같이 발전기들의 비용곡선이 서로 멀리 떨어져있고 기울기가 너무 작은 경우에는 에러값의 개선이 없거나 진동현상을 보이게 된다.

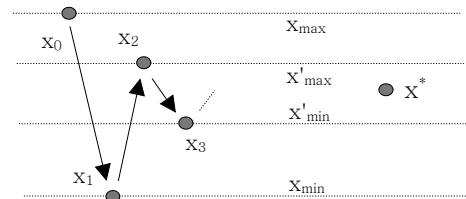


(a) 에러값의 개선이 없는 경우 (b) 진동 현상

〈그림 4〉 수렴특성이 나쁜 경우

그림 4 (a)의 경우는 최적값이 x^* 이고 iteration 진행 중 x_0 다음의 추정값이 x_1 으로 나온 경우이다. 이 때 각 발전기들의 출력값은 두 경우 모두 발전기 A, B는 최대, 발전기 C는 최소로 결정되기 때문에 에러값의 개선이 나타나지 않게 되어 더 이상의 iteration을 진행할 수 없게 된다. 이와 같이 아직 수렴되지 않았는데 에러값의 변동이 없는 경우는 에러값에 변화가 생길 때까지 강제로 일정 값만큼씩 이동시켜 가며 다음 추정값을 찾아야한다. 그림 4 (a)와 같이 x_2 로 강제로 이동시킨 경우라면 발전기 C의 출력이 달라져서 iteration을 진행시킬 수 있게 된다.

Iteration의 step-size에 비해 비용곡선의 기울기가 너무 작은 경우에는 그림 4 (b)와 같이 해 주변에서 진동현상이 발생될 수 있으며 이러한 경우에는 bi-section법을 응용하여 해의 범위를 계속 좁혀갈 수 있다. 그 방법은 다음 그림 5와 같다.



〈그림 5〉 Bi-section법에 의한 해 범위 축소

해 주변에서 진동현상이 발생하는 경우 그림 5와 같이 해의 범위를 좁혀갈 수 있다. x_0 의 경우 해보다 큰 값이므로 에러값이 양수이고 x_1 의 경우는 에러값이 음수이면 두 값 사이에 해가 존재하게 되므로 x_0 를 해의 최대, x_1 을 해의 최소범위로 설정하고 진행하게 된다. x_0 와 x_1 사이의 임의의 값을 다음 추정치(x_2)로 하여 에러값을 계산한 후 에러값이 양수이면 x_2 값을 해의 최대, 에러값이 음수이면 x_2 값을 해의 최소 범위로 변경하고 계속 진행해가면 진동현상없이 해를 찾아갈 수 있게 된다.

3. 결 론

본 논문에서는 실시간 경제급전 프로그램 개발에서 고려되어야 하는 세부조정사항들을 제안하였다. 특히 복합모드로 운전되는 GT와 ST를 등가복합화력기로 변환하여 경제배분에 포함시키고 배분결과에 따른 최종출력도 각 GT별로 결정함으로써 향후 각 GT별로 개별 제어를 가능하게 하였으며 현재출력값이 제한범위 밖에 있는 경우 처리, 예비력 부족 시 재조정 방안, Lambda-iteration법의 수렴특성 개선 방안 등을 제안하였다.

본 논문은 지식경제부에서 시행한 전력산업연구개발사업(과제번호: R-2005-1-398-003)으로 수행되었습니다. 관계자분들께 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] Allen J. Wood, "Power Generation Operation and Control", 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., 1996
- [2] Korean Energy Management System Technical Specification, 한국전력거래소, 2006
- [3] M.Shahidehpour, Y.Wang, "Communication and Control in Electric Power Systems", John Wiley & Sons, Inc., 2003
- [4] 이상호, 오태규, 이정호 등, "한국형 EMS용 경제급전 프로그램 개발", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2007