# 환경제약을 고려한 최적조류계산 알고리즘의 개발에 관한 연구

論 文
51A-11-3

# The Development of Optimal Power Flow Algorithm Considering Environmental Constraints

金 龍 河* · 李 范** · 崔 祥 圭*** · 文 赫 基§ · 鄭 鉉 成§
(Yong-Ha Kim · Buhm Lee · Sang-Kyu Choi · Hyuc-Ki Moon · Hyun-Sung Jung)

**Abstract** - This paper describes an optimal power flow algorithm considering environmental constraints. In this algorithm, we use the costate method, concepts of fictitious generator, variable reduction method and effective constraint for the effective linear programming application. Especially we consider environmental constraints. The proposed method is applied to IEEE RTS-30 model system, 24 and 96 Reliability Test Systems and the results shows the effectiveness of the method.

**Key Words** : 환경제약조건, 가상발전기, 유효제약조건, costate 방법, 모델 및 변수축약

## 1. 서 론

최근, 많은 나라에서 전력회사들은 보유하고 있는 발전기들의 경쟁성 및 유용성을 높이기 위하여 송전계통에 대해서는 각 전력회사가 공용으로 사용할 수 있도록 전력을 공급하기 위한 지역에 대한 규제 및 제약을 완화하고 있으며, 이는 저가격, 고품질, 고안전성을 고려한 전력의 생산 및 분배의 효율성을 극대화 시키기 위한 절대적인 상태 및 추세로 받아들여지고 있다.[1] 이와 같은 상황하에서 우리 나라의 전력산업도 전력산업구조개편에 의해 다양한 형태의 시장경쟁체제로 변화할 것이다. 그러므로 현재 우리 나라의 전력산업에 대한 변화추이, 전력산업의 규제완화로 인한 민자화, 멀지 않은 장래의 인접국가의 다른 계통과의 연계가능성 등을 고려할 때, 계통간의 전력융통을 통한 효율적인 계통운용에 필수적이라 할 수 있는 최적조류계산기법에 대한 연구가 중요하다 하겠다.[2] 한편, 전력산업 구조개편시 고려해야 할 기본적인 또 다른 중요한 문제는 환경의 문제이다. 전 세계적으로 오염물질배출량에 대한 규제가 보다 강화되고 있는 실정이다.[3] 따라서, 본 연구에서는 계산시간이 빠르고 수렴성이 양호하며, 환경규제의 총량규제를 다룰 수 있는 환경제약을 고려한 최적조류계산기법을 개발하는데 연구의 주안점을 두었다.

이를 위하여 본 연구에서는 오염물질 배출량의 총량제약을 고려하여 고려대상기간 전체에 대하여 총량제약을 만족시키면서 발전비용과 오염물질 처리비용의 합을 최소화시키는 각 시간대별 제약치를 구하였고 이 제약치를 최적조류계산문제에서 환경제약고려시 반영하였다. 그리고 최적조류계산의 LP 모델에 포함되는 변수의 개수를 줄이기 위하여 계통이 모델링된 상태에서의 발전기출력에 대한 제어변수를 하나의 제어변수로 축약하는 방법을 사용하였고 또한 최적화과정에서 유효제약조건만을 포함시킴으로써 계산량을 감소시키도록 하였다. 한편, LP를 이용한 최적조류계산을 위하여 선형화과정에 costate 방법[4]을 사용함으로써 계산속도와 정확도면에서의 효율성을 도모하였다. 그리고 본 연구에서 제안한 방법을 시험계통에 적용하여 본 연구의 타당성을 검증하고 유용한 정보를 도출하였다.

* 正 會 員 : 仁川大學校 電氣電子工學部 敎授 · 工博
** 正 會 員 : 麗水大學校 電氣 및 半導體工學科 副敎授 · 工博
***正 會 員 : 安養科學大學 電子通信情報學部 副敎授 · 工博
§ 準 會 員 : 仁川大學校 電氣電子工學部 碩士課程
接受日字 : 2001年 11月 30日
最終完了 : 2002年 8月 19日

## 2. 모델링 및 정식화

### 2.1 환경오염의 총량제약

본 연구에서는 최적조류계산문제에 환경제약을 고려하기 위하여 총량제약이 주어진 경우 계통의 오염물질배출량에 대한 시간대별 규제치를 다음과 같은 방법으로 구하였다. 즉, 오염물질 배출량의 총량제약을 고려하여 고려대상기간전체에 대하여 총량제약을 만족시키면서 발전비용과 오염물질 처리비용의 합을 최소화시키는 각 시간대별 제약치를 구하는 것으로 하였다. 이를 위하여 목적함수는 식(1)로 구성하였으며 제약조건은 (2)~(4)로 구성하였다. 전체 흐름도는 그림 1과 같다.

이와 같이 구해진 시간대별 제약치 $EP^{j}_{gs}$를 다음 절에서 오염물질배출량의 시간대별 제약치로 사용하였다. 단, [$R$]은 가상화폐단위이다.

$$\textbf{Min} \quad Wc \times Cc + Ws \times Cs \tag{1}$$

$$\textbf{Subject to} \quad S_T \le S_T^{\max} \tag{2}$$

$$P_i^{\min} \le P_i^{j} \le P_i^{\max} \tag{3}$$

$$P_D{}^j = \sum_{i}^{NG} P_i{}^j + P_L{}^j \quad (4)$$

단, Wc : 연료비용에 대한 Weighting factor (Wc+Ws=1)
Ws : 오염물질처리비용에 대한 Weighting factor

$$Cc: \text{연료비용} = \sum_{j=1}^{N_S} \nabla T_j \sum_{i=1}^{Ngen} \alpha_i F_i(P_i{}^j) \quad [₩]$$

$$Cs: \text{오염물질처리비용} = \beta S_T \quad [₩]$$

$$S_T: \text{오염물질배출량} = \sum_{j=1}^{N_S} \nabla T_j \sum_{i=1}^{Ngen} \gamma_i F_i(P_i{}^j) \ [\text{Ton}]$$

| | | |
|---|---|---|
| $S_T{}^{max}$ | : 오염물질 배출량 총량 제약 | [Ton] |
| $\nabla T_i$ | : 시간대 | [Hour] |
| $\alpha_i$ | : 발전기 연료비 환산 계수 | [₩/MBTU] |
| $\gamma_i$ | : 발전기별 오염배출계수 | [Ton/₩] |
| $\beta$ | : 오염물질처리비용 환산 계수 | [₩/Ton] |
| $N_{gen}$ | : 계통에 병입된 발전기의 대수 | [MBTU] |
| $N_S$ | : 고려대상기간의 시간대수(j=1,2,……$N_S$) | [Hour] |
| $F_i(P_i{}^j)$ | : j번째 시간대의 i발전기 연료비함수 | [₩/Hour] |
| $P_i{}^j$ | : j번째 시간대의 i 발전기 출력 | [MW] |
| $P_D{}^j$ | : j번째 시간대의 총부하 | [MW] |
| $P_L{}^j$ | : j번째 시간대의 손실 | [MW] |

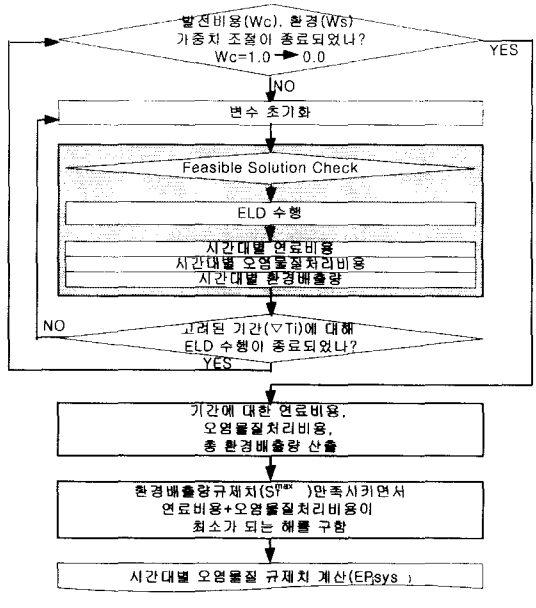


**그림 1** 환경제약고려 흐름도
**Fig. 1** Flow Chart of Environmental Constraint

### 2.2 최적조류계산

계통의 상태변수를 $x$, 제어변수를 $u$ 라 할 때, 초기운전상태 $x^0$, $u^0$하에서는 조류방정식의 계산치전력과 지정치 전력간의 편차가 발생하게 되므로 이때, 각 모선에서의 편차 $P_{Mi}+jQ_{Mi}$를 담당하는 가상발전기를 도입하게 되면 $x^0$와 $u^0$는 가상발전기 출력을 포함한 현재의 계통운전상태를 나타낸다. 이 경우 계통의 실제적인 운전조건은 가상발전기의 출력 $P_{Mi}$ 와 $Q_{Mi}$가 0으로 되도록 제어변수 $u$를 제어함으로써 구해지게 된다. 따라서, 최적조류계산문제는 다음 식(5)~(17)과 같이 가상발전기 출력을 0이 되도록하며 계통의 발전비용을 최소화하는 최적화문제로 정식화할 수 있다.[5]

**o 목적함수**

$$\text{Min.} \quad -\mu \sum_{i}^{n}(|\Delta P_{Mi}|+|\Delta Q_{Mi}|) + \sum_{j}^{NG} F_j(P_{Gj}) \quad (5)$$

**o 제약조건**

$$\sum_{j}^{NG} P_{Gj} - P_L - q = 0 \quad (6)$$

$$V_{Di}{}^{min} \le V_{Di} \le V_{Di}{}^{max} \quad (7)$$

$$T_l \le T_l{}^{max} \quad (8)$$

$$Q_{Gi}{}^{min} \le Q_{Gi} \le Q_{Gi}{}^{max} \quad (9)$$

$$EP_{sys} \le EP_{sys}{}^{max} \quad (10)$$

$$|\Delta P_{Mi}| \le |P_{Mi}| \quad (11)$$

$$|\Delta Q_{Mi}| \le |Q_{Mi}| \quad (12)$$

$$P_{Gj}{}^{min} \le P_{Gj} \le P_{Gj}{}^{max} \quad (13)$$

$$V_{Gi}{}^{min} \le V_{Gi} \le V_{Gi}{}^{max} \quad (14)$$

$$t_l{}^{min} \le t_l \le t_l{}^{max} \quad (15)$$

$$b_{ci}{}^{min} \le b_{ci} \le b_{ci}{}^{max} \quad (16)$$

$$b_{ri}{}^{min} \le b_{ri} \le b_{ri}{}^{max} \quad (17)$$

| | |
|---|---|
| $n$ | : 계통의 모선수 |
| $\mu$ | : 가중치 |
| $\Delta P_{Mi}, \Delta Q_{Mi}$ | : $i$ 모선 가상발전기출력변화량[MW] |
| $NG$ | : 계통의 총발전기수 |
| $P_{Gj}$ | : $j$ 발전기 출력[MW] |
| $P_L$ | : 계통의 총부하[MW] |
| $q$ | : 계통의 총손실[MW] |
| $F_j(P_{Gj})$ | : $j$ 발전기의 연료비 함수[₩] |
| $V_{Di}$ | : $i$ 부하모선의 전압크기[V] |
| $T_l$ | : $l$ 선로의 피상조류크기[MVA] |
| $Q_{Gi}$ | : $i$ 발전기모선의 무효전력[Mvar] |
| $EP_{sys}$ | : 계통의 오염물질 배출량[t] |
| $EP_{sys}^{j}$ | : $j$시간대의 오염물질배출량 규제치[t] |
| $V_{Gi}$ | : $i$ 발전기모선의 전압크기[V] |
| $t_l$ | : $l$ 선로의 변압기 탭 |
| $b_{ci}$ | : $i$ 모선에 연결된 shunt capacitor[F] |
| $b_{ri}$ | : $i$ 모선에 연결된 shunt reactor[H] |
| $*^{min}$ $*^{max}$ | : * 제약조건의 상·하한치 |

## 3. 모델축약

전력계통은 대규모 계통이므로 식(5)~(17)로 구성되는 최적화문제는 대규모 문제가 된다. 그러므로 본 연구에서는 대규모 실계통에서 실시간 적용이 가능한 최적조류계산 알고리즘 개발을 위하여 최적화 과정에 포함되는 변수의 갯수와 제약조건의 갯수를 줄일 수 있는 방법을 도모함으로서 최적화과정의 계산량감축을 도모하는데 주안점을 두었다.

### 3.1 발전기 출력 변수

발전기 출력이 상하한 제약조건 내에서 출력이 결정되는 즉, 등증분연료비의 법칙을 만족시키는 발전기인 경제급전발전기(ED)와 발전기의 출력이 상한치나 하한치로 결정되거나 (계통 증분비와 다른 증분비용을 갖는 발전기) 고정출력으로 운전됨으로써 계통의 경제부하배분에 참여할 수 없는 발전기인 개별급전발전기(ID)로 분류하였다. 지금, ED에 속하는 발전기의 출력 $P_{Gk}$의 변화량 $\Delta P_{Gk}$는 Economic Paricipation Factor를 이용하여 최적화과정 후에 각 발전기의 출력으로 분배가 가능하면, ED 발전 증감량에 대한 단일 변수로 최적화과정 중에 고려할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 최적화과정 중의 제어변수의 수를 감소시키기 위하여 ED에 속하는 발전기의 출력을 하나의 변수 $w$로 축약하도록 하였으며 최적화과정 이후에 Economic Participation Factor( $pf_k$)를 사용하여 식(18)로서 각 발전기의 출력을 구하도록 하였다.

$$\Delta P_{Gk} = pf_k \cdot w \tag{18}$$

$$\text{단, } pf_k = \frac{\frac{1}{2\gamma_k}\left(1-\frac{dq}{dP_{Gk}}\right)}{\sum_{k\in ED}\frac{1}{2\gamma_k}\left(1-\frac{dq}{dP_{Gk}}\right)} \tag{19}$$

$w$ : 계통ED 발전기의 총 발전변화량[MW]

이때, 식(19)에서 $dq/dP_{Gk}$의 계산식은 Costate방법을 이용하여 다음과 같이 유도하였다. 우선 전력계통의 전력평형 방정식은 식(20)과 같다.

$$\sum_i P_{Gi} - P_L - q = 0 \tag{20}$$

$P_{Gi}$ : $i$번째 발전기의 유효전력출력
$P_L$ : 계통부하
$q$ : 계통손실

식(20)으로부터 손실 $q$는 다음 식(21)과 같이 표현된다.

$$q=\sum_i P_{Gi}-P_L=P_{GS}+P_{G2}+P_{G3}+\cdots+P_{GN}-P_L \tag{21}$$

위의 식(21)에서 손실 $q$는 슬랙모선에서의 발전기출력 $P_{GS}$와 제어변수 $P_{G2}, P_{G3}\cdots$ 로서 정의되어지며, 슬랙모선의 출력 $P_{GS}$ 는 식(22)와 같이 상태변수의 함수로써 표현될 수 있다.

$$P_{GS}=\sum_{j\in K}P_{sj} \tag{22}$$

$K$ : 슬랙모선에 연결된 모선의 집합
$P_{sj}$ : 슬랙모선에서 $j$모선으로 흐르는 유효전력조류

식(22)를 식(21)에 대입하면 식(23)으로 정리된다.

$$q=\sum_{j\in K}P_{sj}+P_{G2}+P_{G3}+\cdots+P_{GN}-P_L \tag{23}$$

그러므로 증분손실율 $\frac{dq}{dP_{Gk}}$를 Costate방법에 의하여 구해보면 $\frac{\partial q(\mathbf{X},\mathbf{U})}{\partial P_{Gk}}$는 식(23)으로부터 1로 계산되어지며, $\frac{\partial g(\mathbf{X},\mathbf{U})}{\partial P_{Gk}}$는 전력조류방정식으로부터 계산이 가능하고, $\left(\frac{\partial g(\mathbf{X},\mathbf{U})}{\partial \mathbf{X}}\right)$는 Jacobian 행렬이며, Costate $\mathbf{x}^T$는 식(21)이나, 식(23)에서 $P_{GS}$만이 상태변수의 함수이고 나머지변수는 제어변수이고 $P_L$은 상수이므로 증분손실율을 식(24)로 계산하였다.

$$\frac{dq(\mathbf{X},\mathbf{U})}{dP_{Gk}} = \frac{\partial q(\mathbf{X},\mathbf{U})}{\partial P_{Gk}} - \hat{\mathbf{x}}^T\frac{\partial g(\mathbf{X},\mathbf{U})}{\partial P_{Gk}}$$
$$= 1-\left(\frac{\partial q}{\partial \mathbf{X}}\right)\left(\frac{\partial g(\mathbf{X},\mathbf{U})}{\partial \mathbf{X}}\right)^{-1}\frac{\partial g(\mathbf{X},\mathbf{U})}{\partial P_{Gk}} \tag{24}$$

즉, $dq/dP_{Gk}$는 식(24)에서와 같이 상태변수 및 제어변수로부터 계산하도록 하였다.

### 3.2 가상발전기 출력 변수

가상발전기 출력변수는 원래의 최적조류계산문제에는 포함되어 있지 않는 변수로서 최적화과정 중에서 모든 모선의 가상발전기 출력을 개별적으로 각각 제어하게 되면 계산의 효율성이 떨어지게 된다. 일반적으로 각 모선에 연결된 가상발전기 출력의 감소율은 다소는 차이가 있지만 대부분의 모선들은 그 감소율이 일정정도 유사하게 된다. 그러므로 본 연구에서는 다음과 같이 모든 가상발전기 출력 감소율을 동일한 것으로 가정하여 모든 모선의 가상발전기 출력대신에 하나의 출력 감소율 $v$를 최적화과정에서 제어변수로 포함시켰다. 식(25)는 가상발전기 출력의 규준화된 감소율 $v$에 의한 모든 모선에 연결된 가상발전기의 출력 감소량을 계산하는 식이다.

$$\Delta P_{Mi} = -P_{Mi}v, \qquad i=1,2,\cdots,n$$
$$\Delta Q_{Mi} = -Q_{Mi}v, \qquad i=1,2,\cdots,n \tag{25}$$

식(25)에서 가상발전기 출력은 최적화과정을 통해 감소되는 방향으로 제어되어야 하므로 음의 부호(-)가 붙는다. 이와 같이 규준화된 가상발전기 출력 감소율에 의한 비례기법을 이용하면, 대부분의 가상발전기 출력은 몇 번만의 반복계산 내에서 허용오차 이내로 수렴하게 되나, 소수의 일부 모선의 가상발전기 출력은 실제로 출력의 감소율이 낮아서 최소화로의 수렴이 늦어질 수도 있다. 그러므로 본 연구에서는 식(26)으로 가상발전기 출력의 수렴율이 낮은 모선을 판별하여 개별제어하도록 하였다.

$$\frac{\left|(P_{Mi})^{\nu+1}-(P_{Mi}{}^*)^{\nu}\right|+\left|(Q_{Mi})^{\nu+1}-(Q_{Mi}{}^*)^{\nu}\right|}{\left|(P_{Mi})^{\nu+1}\right|+\left|(Q_{Mi})^{\nu+1}\right|} > \varepsilon \tag{26}$$

단, $\nu$ : 반복회수

$\varepsilon$ : 허용한계치

$(P_{Mi}^{*})^{\nu}, (Q_{Mi}^{*})^{\nu}$ : 최적화과정 후에 식(25)로 계산된 가상발전기의 출력

$(P_{Mi})^{\nu+1}, (Q_{Mi})^{\nu+1}$ : 다음 반복계산에서의 계산치 전력과 지정치전력의 편차로 계산된 가상발전기 출력

그러므로 식(26)은 각 모선의 가상발전기 출력에 대한 상대적 수렴율을 의미한다. 본 연구에서는 식(26)으로 수렴이 늦은 가상발전기를 판별하여 이들에 대해서는 개별제어함으로써 동일한 감소율 $\upsilon$로 가상발전기의 출력을 제어할 경우에 발생할 수 있는 수렴속도의 저하요인을 제거하였다.

### 3.3 유효운전제약조건

대규모 전력계통에서는 운전제약조건을 위반하는 경우가 종종 발생할 수도 있다. 그러나 실제적으로 최적화과정 중에 직접적인 영향을 미치게 되는 운전제약조건(유효제약조건)의 수는 많지 않다. 그러므로 운전제약의 충분한 범위내에 운전되고 있는 운약조건을 모두 최적화 모델에 포함시키는 것은 계산의 효율성을 떨어뜨리게 된다. 즉, 유효제약조건만을 최적화 모델에 포함시키게 되면 보다 효율적인 계산을 할 수 있다. 본 연구에서는 위반된 운전제약조건과 운전제약조건의 한계치에 근접한 운전제약조건만을 식(27)이나 식(28)로 판정하여 이들만을 LP 과정의 제약조건으로 포함시키도록 하였다. 이 경우, 한번 한계치를 위반한 유효운전제약조건은 다음 반복계산에서 운전제약을 만족하더라도 그 다음의 반복계산에서 다시 한계치를 위반할 확률이 높으므로 양호한 수렴성의 확보를 위하여 최적조류계산문제가 수렴할 때까지 유효 운전제약조건에 계속적으로 포함시키도록 하였다.

$$H(x,u)^{\max} - H(x,u) \le \varepsilon_1 \quad (27)$$

$$H(x,u) - H(x,u)^{\min} \le \varepsilon_2 \quad (28)$$

$H(x,u)$ : 운전제약조건의 현재 계산치

$H(x,u)^{\max}$, $H(x,u)^{\min}$ : 운전제약조건 최대치, 최소치

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ : 허용한계치

## 4. LP 문제로의 정식화

### 4.1 선형화

앞의 식(5)~(17)로 표현되는 최적조류계산문제를 선형계획법을 이용하여 최적조류계산을 행하기 위해서는 목적함수 및 제약조건들이 선형화 되어야 한다. 이는 수학적으로 식(29)와 같이 운전점 ( $x^0, u^0$)의 근방에서 제어변수 $u$ 에 대하여 함수 $f(x,u)$를 선형화 함으로써 구해진다.

$$f(x,u) \cong f(x^0,u^0) + \sum_{c}^{NCV} \frac{df(x^0,u^0)}{du_c} \Delta u_c \quad (29)$$

단, $NCV$ : 제어변수의 수

#### 4.1.1 목적함수 및 환경제약조건의 선형화

식(5)의 목적함수에서 총 발전비용을 경제급전발전기와 개별급전발전기의 총 발전비용으로 분류하여 표현하면 다음 식(30)과 같다.

$$F_T = \sum_{k\in ED}(\alpha_k + \beta_k P_{Gk} + \gamma_k P_{Gk}^{2}) + \sum_{m\in ID}(\alpha_m + \beta_m P_{Gm} + \gamma_m P_{Gm}^{2}) \quad (30)$$

식(30)의 총 발전비용은 발전기 출력만의 함수이므로, 발전기출력변수에 대해서 미분하고, 식(18)의 변수축약을 적용하면 선형화된 목적함수 결과식은 식(31)과 같다.

$$F_T = \sum_{k\in ED}[\,(\beta_k + 2\gamma_k P_{Gk})\,pf_k\,]\,w + \sum_{i}^{NGB}[\,\sum_{m\in ID,i}\{(\beta_m + 2\gamma_m P_{Gm})\,pf_{m(i)}\}\,\Delta P_{ID,i}\,] \quad (31)$$

단, $NGB$ : 발전기모선수

$pf_k$ : $k$번째 경제급전발전기의 Participation Factor

$pf_{m(i)}$ : $i$모선의 $m$번째 개별급전발전기의 Participation Factor

$\Delta P_{ID,i}$ : $i$ 모선 개별급전기의 발전변화량[MW]

한편, 식(10)으로 주어진 환경제약조건 또한 발전기 출력에 의해서만 변화되는 함수이므로 목적함수의 선형화와 동일한 과정으로 선형화하면 식(32)로 정리된다.

$$\sum_{k\in ED}^{NG_{sys}}[\,f_k(\beta_k + 2\gamma_k P_{G_m})\,pf_k\,]\,w + \sum_{i}^{NGB_{sys}}[\,\sum_{m\in ID,i} f_m\,\{(\beta_m + 2\gamma_m P_{Gm})\,pf_{m(i)}\}\,]\Delta P_{ID,i} \le \Delta EP_{sys}^{\max} \quad (32)$$

단, $NG_{sys}$ : 계통의 발전기수

$NGB_{sys}$ : 계통의 발전기모선수

#### 4.1.2 운전제약조건의 선형화

본 연구에서는 운전제약조건 식(6)~(9)의 효율적인 선형화를 위하여 정확하고 계산시간이 빠른 기법으로 알려진 Costate 방법을 이용하였다. Costate 방법에 의하면 앞의 식(29)에서 감도 $\frac{df(x,u)}{du}$에 대한 계산식은 식(33)으로 계산된다.[4] 여기서 $\frac{\partial g(x,u)}{\partial x}$는 Jacobian 행렬이다.

$$\frac{df(x,u)}{du} = \frac{\partial f(x,u)}{\partial u} - \frac{\partial f(x,u)}{\partial x}\left[\frac{\partial g(x,u)}{\partial x}\right]^{-1}\frac{\partial g(x,u)}{\partial u} \quad (33)$$

### 4.2 정식화

앞에서 설명한 목적함수와 제약조건의 선형화 및 변수축약을 통하여 식(5)~(17)로 표현되는 대규모 최적조류계산문제를 식(34)~(42)와 같이 문제의 크기가 축소된 최적조류계산문제로 정식화되며, 그림2는 전체 계산흐름도를 보인 것이다.

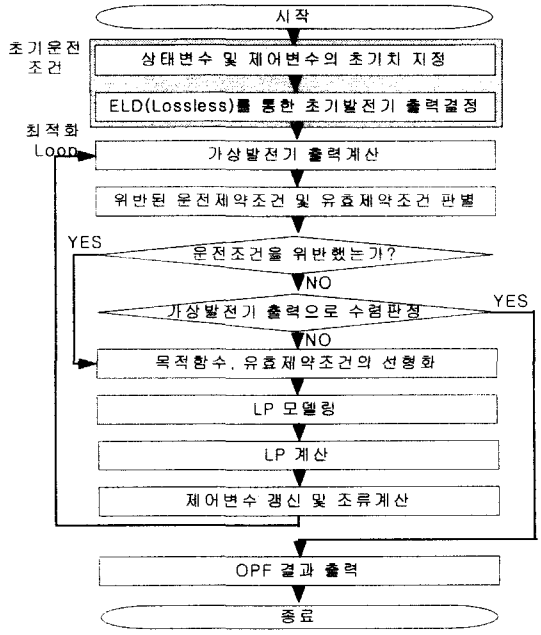


**그림 2** 최적조류계산의 흐름도

**Fig. 2** Flow chart of Optimal Power Flow

**o 목적함수**

$$\text{Min.} \quad \sum_{i=1}^{m} a_{F_{i1}} v_j + a_{F_{w}} w + \sum_{i=1}^{NGB} a_{F_i} \Delta P_{ID,i} \tag{34}$$

**o 제약조건**

$$\sum_{i=1}^{m} a_{g_{i1}} v_j + a_{g_w} w + \sum_{c=1}^{NCV-1-m} a_{g_c} \Delta u_c = 0 \tag{35}$$

$$\Delta V_{Di}^{\min} \le \sum_{i=1}^{m} a_{V_{i1}} v_j + a_{V_w} w + \sum_{c=1}^{NCV-1-m} a_{V_c} \Delta u_c \le \Delta V_{Di}^{\max} \tag{36}$$

$$i = 1 \ldots NDB(effec)$$

$$\sum_{i=1}^{m} a_{T_{i1}} v_j + a_{T_w} w + \sum_{c=1}^{NCV-1-m} a_{T_c} \Delta u_c \le \Delta T_l^{\max} \tag{37}$$

$$l = 1 \ldots NTL(effec)$$

$$\Delta Q_{Gi}^{\min} \le \sum_{i=1}^{m} a_{Q_{i1}} v_j + a_{Q_w} w + \sum_{c=1}^{NCV-1-m} a_{Q_c} \Delta u_c \le \Delta Q_{Gi}^{\max} \tag{38}$$

$$i = 1 \ldots NGB(effec)$$

$$\sum_{i=1}^{m} a_{EP_{i1}} v_j + a_{EP_{sys,w}} w + \sum_{c=1}^{NCV-1-m} a_{EP_{sys,c}} \Delta u_{sys,c} \le \Delta EP_{sys}^{\max} \tag{39}$$

$$0.0 \le v \le 1.0 \tag{40}$$

$$P_{ED} - P_{ED}^{\min} \le w \le P_{ED}^{\max} - P_{ED} \tag{41}$$

$$\Delta u_c^{\min} \le \Delta u_c \le \Delta u_c^{\max} \tag{42}$$

$$c = 1 \ldots (NCV-1-m), \quad u_c = P_{ID,i}, V_{Gi}, t_l, b_{ci}, b_{ti}$$

단, $a_{*_n}$ : 각 선형화식에 대한 $n$번째 제어변수 계수

$NGB$ : 발전기모선수

$\Delta P_{ID,i}$ : $i$ 모선 개별급전기의 발전변화량[MW]

$u_c$ : $c$ 번째 제어변수( $v, w$ 제외한 제어변수)

$NCV$ : 제어변수의 수

$NDB(effec)$ : 부하모선전압의 유효제약조건수

$NTL(effec)$ : 선로피상조류의 유효제약조건수

$NGB(effec)$ : 발전기모선 무효전력의 유효제약조건수

$P_{ED}$ : 경제급전 발전량[MW]

## 5. 사례연구

본 연구에서는 제안한 알고리즘을 시험계통[3]에 적용시켜 본 연구의 알고리즘의 유용성을 타진하여보았다.

### 5.1 환경오염의 총량제약

IEEE RTS-24 계통의 최대부하가 속해있는 51주의 일간 최대부하를 대상으로 환경 총량제약을 부가하지 않았을 경우 1주일에 대한 총발전비용은 292,974.8[₩], 배출량은 129.5 [Ton]으로 산정되었다. 이때 최대부하인 2,850[MW] 부하에 대해서는 45743.6[₩], 20.5[Ton]으로 계산되었다. 그러므로 본 연구에서는 기간의 총 제약을 100[Ton]으로 하여 운전모의 하였으며 그림 3은 이의 결과를 보인 것이다.

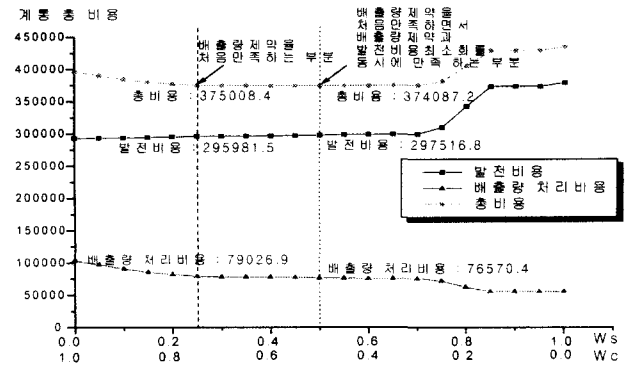


**그림 3** 최적해의 결과

**Fig. 3** Result of Optimal Solution

이 경우 1주일에 대한 총발전비용은 297,516.8[₩], 배출량은 95.7[Ton]으로 산정되었다. 이때 최대부하인 2,850[MW] 부하에 대해서는 46613.4[₩], 15.4[Ton]으로 계산되었다. 참고로 본 알고리즘에 의하면 목적함수에 발전비용과 환경비용 모두를 고려하였으므로 주어진 총량환경제약을 정확히 만족하는 발전출력이 항상 최적해로 구해지는 것은 아니고 오히려 환경오염배출량 처리비용에 따라서는 오염물질을 주어진 제약보다 덜 배출하는 것이 최적해로 구해지는 것이다.

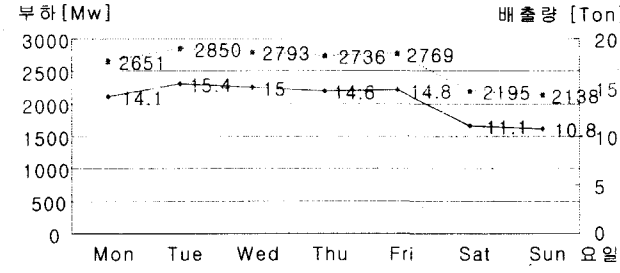


**그림 4** 일별 환경배출량

**Fig. 4** Daily Emissions

한편, 각 일별 최적환경배출량은 그림 4로 구해졌다. 그러므로 본 연구에서는 위와같이 산정된 15.4[Ton]을 다음 단계에 계산하는 최적조류계산의 환경제약치로 고려하도록 하였다.

### 5.2 최적조류계산

우선 제안한 알고리즘의 기본특성을 검토하기 위하여 환경제약을 고려하지 않으며 본 연구에서 제시하는 모델축약 및 최적화과정에서 유효운전제약조건만을 사용하고 부하모선전압, 선로피상조류, 발전기모선 무효전력 제약조건만을 고려한 경우 최적조류계산기법은 0.01 [p.u]의 수렴 허용한계치를 줄 경우 IEEE RTS-24계통에서는 5회만에 수렴하였으며 총비용은 47,840.4[₩]로 계산되었다. IEEE RTS-96계통에서는 7회만에 수렴하였으며 총비용은 159,462.3[₩]로 계산되었다. 그림 5 및 그림 6은 IEEE RTS-96에 대한 본 연구 결과의 수렴과정을 보인 것이다.

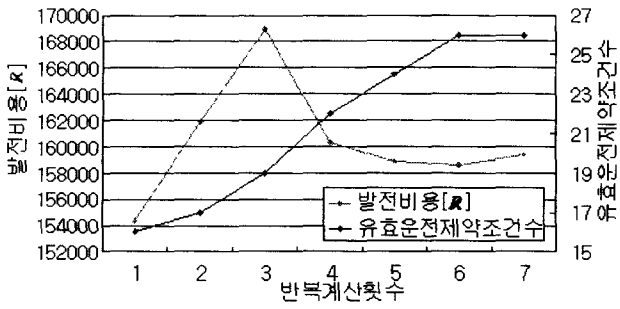


**그림 5** 발전비용 및 유효제약조건의 수렴

**Fig. 5** Convergence of production cost and effective constraints

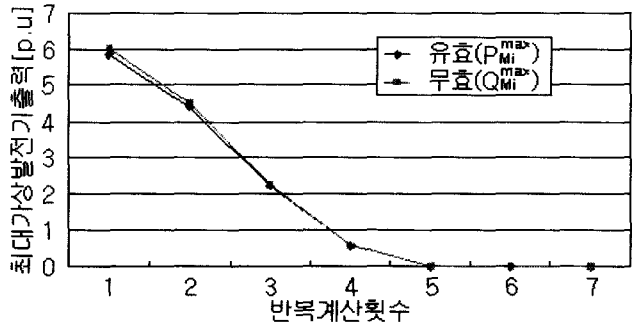


**그림 6** 가상발전기 출력의 변화

**Fig. 6** Output of fictitious generator

그림 6에서 최대 가상발전기의 출력은 반복횟수 5회에서 허용범위 0.01이 만족되었으나, 제약조건을 모두 만족시키고 있지 못하여 이를 만족시키기 위하여 7회까지의 계산을 수행하였다. 이로서 6회 반복시에 5회의 계산에 비하여 2개의 제약조건이 추가되었으며 이 경우에도 제약조건이 모두 만족되지 못하여 7회의 계산을 수행한 것이다. 그러나 7회의 반복계산에서는 새로 위반되는 제약조건이 추가로 발생하지 않아 유효운전제약조건수는 6회와 동일하나 발전비용은 다소 증가하게 된 것이다. 가상발전기의 출력감소는 결국 각 모선에서 전력수급방정식을 만족시키기 위하여 얼마나 제어변수가 최적으로 접근하고 있는가를 의미하는데 반복부분의 처음부분에서는 그 변화폭이 크게 움직이고 있으며 최적해에 가까워질수록 미소하게 변화하고 있는바 이는 본 연구에서 제안한 방법의 수렴성이 안정적인 것을 보여준다 하겠다. 한편 본 연구에서 처리한 유효제약조건을 사용한 경우에 대한 효용성을 검증하기 위하여 유효제약조건을 사용하지 않은 경우와 결과치의 정확도와 계산소요시간의 측면을 비교하여 보았다. IEEE RTS-96계통의 경우에 모든 운전제약조건의 수는 193개이나 전체 운전제약조건을 사용하지 않고 본 연구에서의 유효제약조건판별식을 이용하면 최종 26개의 유효운전제약조건만이 최적화과정에 포함되어 계산되게 된다. 한편 모든 운전제약조건을 포함시켜 계산한 경우에는 총 5회만에 수렴하였으며 이때 계산시간은 유효제약을 고려한 경우에 비하여 3.5배정도 증가하였다. 즉, 본 연구에서 제안한 방법이 반복계산횟수면에서는 다소 증가하였으나 최적화과정의 매 반복계산에서의 계산시간이 축소되어 전체계산 시간은 대폭 감소되고 있음을 알 수 있다. 이때 발전비용은 운전제약조건을 모두 사용한 경우에 비하여 약 0.1%의 차이를 보였다.

다음에 본 알고리즘의 정확도 검증하기 위하여 참고문헌 [7]에서 적용한 IEEE RTS-30모선 모델계통의 계산결과와 비교하였으며 그 비교내용을 표1에 나타내었다. 이 표1로부터 제안한 방법에 대한 신뢰성을 검증할 수 있다는 것을 알 수 있다.

**표 1** 다른 방법과 계산결과의 비교

**Table 1** Comparison of results with other method

| | 참고문헌[7] | 제안한 방법 |
|---|---|---|
| 발전비용 | 802.400[₩] | 804.756[₩] |
| 유효전력손실 | 9.480[MW] | 9.212[MW] |

다음에 본 알고리즘의 강건성을 검증하기 위하여 각 모선의 부하를 -15% ~ 15%의 범위에서 변화시켜 가면서 운전모의 하여 보았고 그 결과 본 연구에서 제안하는 알고리즘은 다양한 계통상태에 대해서도 수렴특성이 매우 양호하였다. 그리고, 참고로 본 알고리즘의 계산시간을 표2에 나타내었다. 표2에서 IEEE RTS-96 계통에서 계산시간이 크게 늘어난 이유는 계통규모 및 반복계산횟수가 증가한 이유도 있지만 유효운전제약조건수가 최종 수렴할 때까지 IEEE RTS-30모선 모델계통에서는 2개였는데 비해서 IEEE RTS-96 계통에서는 26개로 유효운전제약조건수의 차이에도 그 원인이 있다고 하겠다.

**표 2** 제안한 방법의 계산시간

**Table 2** Caculation time of proposed method

| | IEEE RTS-24 모선 모델계통 | IEEE RTS-30 모선 모델계통 | IEEE RTS-96 모선 모델계통 |
|---|---|---|---|
| 반복계산횟수 | 5 | 5 | 7 |
| 계산시간(초) | 0.33 | 0.45 | 6.16 |

기종 : Intel(R) Pentium(R) 4 CPU 1.50GHz, 256MB RAM

한편 5.1절에서 구해진 환경제약치를 부가한 경우 최적조류계산 결과는 그림7로 구해졌다. 경제부하배분을 행하면 발전비용은 45,743.6[₩]로 구해지는 반면에 총량제약 100[Ton]을 부가한 경우 최적조류계산에 사용되는 부하인 2,850[MW]부하에 대한 경제부하배분의 결과중 발전비용은 46,613.4[₩]로 계산되었으며 이때 계산된 환경제약을 최적조류계산에

부가한 경우(15.4[Ton]) 발전비용은 53,868.8[₩]로 산정되었으며 환경제약이 부가되지 않은 경우의 최적조류계산의 결과는 47,840.4[₩]으로 계산되었다. 이상의 4가지 경우를 비교하면 그림 7과 같다.

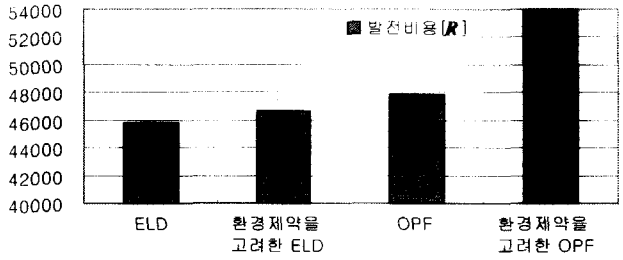


**그림 7** 각종결과의 비교

**Fig. 7** Comparison of each result

그림 7에서와 같이 발전비용을 비교해보면 경제부하배분에 의한 발전비용 < 환경제약을 고려한 경제부하배분에 의한 발전비용 < 최적조류계산에 의한 발전비용 < 환경제약을 고려한 최적조류계산에 의한 발전비용 순으로 계산되어 이로서 본 연구의 최적조류계산법이 예측가능한 범위에서 안정적이며 신속한 결과를 제공하고 있음을 알 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 계산시간이 빠르고 수렴성이 양호하며, 총량환경규제를 고려할 수 있는 최적조류계산기법을 제안하였다. 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 가상발전기 출력 및 발전기의 출력을 각각 하나의 변수로 축약하여 LP 최적화 모델에 포함되는 변수의 개수를 축소하였으며, 최적화과정에 유효제약조건만을 포함시킴으로써 최적조류계산의 계산량 단축을 도모하였다.

(2) 최적조류계산문제의 선형화과정에 계산속도와 정확도 면에서 효율성이 우수한 것으로 입증된 Costate 방법을 도입하여 제약조건에 대한 선형화 작업을 보다 정확하고 신속하게 처리할 수 있도록 하였다.

(3) 환경규제 강화에 대비하여 총량환경제약으로부터 시간대별 최적 환경제약치를 구하여 이를 최적조류계산의 제약치로 사용하도록 하는 즉, 발전비용 및 환경비용 모두를 고려한 총량환경량 최적 분배를 OFF-LINE으로 행하도록 하였다.

(4) 앞으로 전압안정도제약조건을 고려할 수 있는 알고리즘을 개발하고 실계통에의 적용을 통해 실질적인 각종 정보를 도출하는 작업이 필요할 것으로 사료된다.

**감사의 글**

"본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관 및 동북아전자물류연구센터의 일부지원으로 수행되었음"

## 참 고 문 헌

[1] 김용하, 이범, 최상규, 박상민, 조재한, "전력탁송영향평가 알고리즘에 관한 연구" 대한전기학회 논문지, 대한전기학회, 1999. 10.

[2] Xingyong H. Chao, "Nondivergent and Optimal Power Flow - a Unified Approach", Ph. D. Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, September, 1991

[3] IEEE Committee Report ; "IEEE Reliability Test System-Extensions to and Evaluation of the Generating System", IEEE, Vol. PWRS-1, No.4, pp. 1-7, Nov., 1986.

[4] A. P. Meliopoulos, Power System Control Center-Theory and Operation, EE6520 Notes, Georgia Tech.

[5] A. P. Meliopoulos, A. G. Bakirtizis, R. R. Kovacs and R. J. Beck, "Bulk Power System Reliability Assessment Experience with the RECS Program", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRS-1, No. 3, pp.235-243, August 1986.

## 저 자 소 개

**김 용 하 (金 龍 河)**

1959년 5월 16일생. 1982년 고려대 전기공학과 졸업. 1987년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1992년~현재 인천대학교 전기전자공학부 교수.

Tel : (032) 770-8434

Email : yhkim@lion.inchon.ac.kr

**이 범 (李 範)**

1959년 10월 28일생. 1981년 고려대 전기공학과 졸업. 1989년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995년~현재 여수대학교 전기 및 반도체공학과 부교수.

Tel : (061) 659-3313

Email : buhmlee@yosu.ac.kr

**최 상 규 (崔 祥 圭)**

1960년 12월 22일생. 1983년 충북대 전기공학과 졸업. 1986년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1990년~현재 안양과학대학 전기제어과 부교수.

Tel : (031) 441-1326

Email : cskm@aytc.anyang-c.ac.kr

**문 혁 기 (文 赫 基)**

1975년 7월 15일생. 2000년 시립인천대학교 전기공학과 졸업. 2000년~현재 동 대학원 석사과정

E-mail : moon4746@hanmail.net

**정 현 성 (鄭 鉉 成)**

1975년 10월 25일생. 2000년 시립인천대학교 전기공학과 졸업. 2000년~현재 동 대학원 석사과정

E-mail : capjhs@hanmail.net