

# ADM 기반 분산처리 최적조류계산을 이용한 다지역 제약급전계획 알고리즘

논 문
59P-3-1

## Constrained Multi-Area Dispatch Scheduling Algorithm with Regionally Distributed Optimal Power Flow Using Alternating Direction Method

정 구 형<sup>†</sup> · 김 발 호\* · 이 종 주\*\* · 김 학 만\*\*\*  
(Koo-Hyung Chung · Bal-Ho Kim · Jong-Joo Lee · Hak-Man Kim)

**Abstract** - This paper proposes a constrained multi-area dispatch scheduling algorithm applicable to interconnected power system operations. The dispatch scheduling formulated as an MIP problem can be efficiently computed by GBD algorithm. GBD guarantees adequate computation speed and solution convergence by reducing the dimension of the dispatch scheduling problem. In addition, the regional decomposition technique based on ADM is introduced to obtain efficient inter-temporal OPF solution. It can find the most economic dispatch schedule incorporating power transactions without each regional utility's private information open.

**Key Words** : Constrained Dispatch Scheduling Algorithm, Mixed Integer Programming, Generalized Benders Decomposition, Alternating Direction Method, Regional Decomposition

### 1. 서 론

급전계획(Dispatch Scheduling)은 계통수요를 만족함과 동시에 최적의 경제성을 확보하기 위해 발전기 출력을 배분하는 것으로써, 효율적인 전력계통 운영과 관련된 중요한 문제 가운데 하나이다. 전통적인 급전계획 문제는 크게 발전기의 투입 여부를 결정하는 기동정지계획(unit commitment, UC)과 특정 시간대에 계통투입이 결정된 발전기 간 경제적 발전량을 산정하는 경제급전(economic dispatch, ED)에 의해 수행되었다[1]. 그러나 다수의 전력회사가 전력시장에 참여하여 경쟁하는 상황 하에서는 발전 및 송전계통 변수들 간에 존재하는 복잡한 상호작용으로 인해 각 전력회사의 이익이 크게 달라질 수 있는 가능성이 존재하기 때문에, 급전계획 시 이에 대한 보다 정확한 정보를 제공해야만 한다. 따라서 연계계통에서의 급전계획을 수립하기 위해서는 기동정지계획(UC)과 최적조류계산(optimal power flow, OPF)의 통합 모형을 이용하는 것이 보다 합리적이라 할 수 있다[2]. 이는 최적조류계산(OPF) 문제를 통해 상세하게 모형화된 송전계통을 고려하여 매 시간마다의 최적의 계통운전상태를 도출할 수 있기 때문이다. 그 결과, 연계계통에서의 급전계획 문제는 수학적으로 급전대상기간 동안 각 발전기의 기동/정지 여부를 나타내는 이진변수(binary variables) 뿐만 아니라 발전출력 및 다양한 계통상태에 대한 연속변수(continuous

variables)를 포함하는 대규모 혼합정수계획(mixed integer programming, MIP) 문제로 정식화된다.

UC와 OPF 문제를 동시에 수행하여 이론적으로 최적해를 도출할 수 있는 최적화 기법은 참고문헌 [3]에서 최초로 제안되었다. 이는 Lagrangian relaxation(LR)기법을 도입하여 제약급전계획 문제를 UC와 OPF에 대한 두 개의 부문제(subproblems)로 분해하며 각각의 결과를 도출한 후 이를 조정하는 과정을 반복적으로 수행함으로써 발전계통과 송전계통을 동시에 최적화한다. 그러나 이는 최초의 급전시간에서만 송전제약조건을 고려하기 때문에, 전체적인 관점에서는 송전계통 운전의 최적화가 이루어지지 않는다. 참고문헌 [4]에서는 이러한 단점을 보완하여 모든 급전대상 시간에 대해 송전제약을 고려하였으며, 수력발전기의 협조 문제 또한 반영하였다. 이와 함께, LR 기법을 기반으로 하는 다양한 알고리즘을 검토함으로써 제약급전계획 문제를 보다 효율적으로 수행할 수 있도록 하였다. 그러나 LR 기법을 기반으로 하는 제약급전계획 알고리즘은 각각의 수-화력 발전기에 대해 문제를 분리하기 때문에, 송전계통을 반영하기 위해 이를 근사화하는 과정에서 정확성이 일부 상실되는 단점을 갖는다.

따라서 제약급전계획 수립 시 송전계통을 직관적으로 반영하기 위한 방법을 필요로 하게 되는데, 이를 가능하게 하는 것이 generalized Benders decomposition(GBD) 기법이다 [5,6]. GBD 기법은 제약급전계획 문제를 발전기 기동/정지상태에 대해 주문제로부터 주어진 발전기 기동/정지상태에서의 최적 계통운전상태를 평가하는 다기간 OPF 부문제(subproblems)의 2단계 최적화 문제로 분리하여 원문제의 크기를 상당히 축소시킴으로써 계산속도 및 해의 수렴성을 개선하며, 다기간 OPF 부문제를 통해 송전계통을 직관적으로 반영함으로써 보다 정확한 제약 급전계획의 해를 도출한다[7]. 그 결과, GBD 기법을 기반으로 하는 제약급전계획

<sup>†</sup> 교신저자 정회원 : 한국전기연구원 Smart Grid연구센터 선임연구원 · 공박  
E-mail : kchung@keri.re.kr

\* 정 회 원 : 홍익대학교 전자전기제어공학부 교수 · 공박

\*\* 정 회 원 : 한국전기연구원 Smart Grid연구센터 위촉선임연구원 · 공박

\*\*\* 시니어회원 : 인천대학교 전기공학과 교수 · 공박

접수일자 : 2010년 5월 7일

최종완료 : 2010년 7월 7일

알고리즘 개발에 대한 많은 연구가 진행되고 있다[8-15].

이러한 연구들은 모든 전력사업자의 정보가 공개된 상태에서 계통운영자가 단독으로 급전계획을 수립하는 것을 전제로 하고 있다. 그러나 각 전력회사가 지역별로 자신의 계통을 독자적으로 운영하며 계통연계를 통해 상호경쟁하는 상황 하에서는 계통운영자가 모든 발전기의 운전상태를 통제하는 기존의 방법으로는 급전계획을 수행할 수 없게 된다. 따라서 이러한 환경 하에서는 각 전력회사가 자신의 고유정보를 보호함과 동시에 계통운영자의 직접적인 통제 없이도 전체 계통에 대한 최적운전을 가능할 수 있도록 하는 새로운 제약급전계획 알고리즘의 개발을 필요로 한다. 이러한 문제는 지역분할 기반 분산처리 OPF 알고리즘[16-18]을 통해 쉽게 해결할 수 있다. 이 방법은 제약급전계획 부문제를 단순히 지역에 따라 분할하여 각 지역에 대한 다기간 OPF를 개별적으로 수행한 다음, 최적해에 도달할 때까지 그 계산을 반복 수행한다. 그 결과, 각 지역의 전력사업자는 자신의 발전기에 대한 비용함수와 같은 고유정보를 외부에 공개하지 않고서도 독자적인 급전계획을 수립할 수 있다. 특히, 각 지역별로 분리된 다기간 OPF 문제의 augmented Lagrangian 함수를 직접 이용하는 alternating direction method(ADM)[19-21]은 근사화된 augmented Lagrangian 함수를 이용하는 다른 분산처리 알고리즘에 비해 계산속도가 보다 우수하다는 장점을 갖는다.

이를 바탕으로, 본 논문에서는 GBD와 ADM 기법을 기반으로 하는 새로운 제약급전계획 알고리즘의 개발에 대해 기술하였다. 우선, MIP 문제로 정식화되는 제약급전계획 문제를 GBD 기법을 도입하여 각 발전기의 운전, 기동 및 정지상태를 결정하는 UC 주문제와 해당 급전기간 동안 주어진 발전기 기동/정지상태 하에서의 다기간 OPF 부문제로 분리하였다. 그 다음, 다기간 OPF 부문제를 ADM 알고리즘을 이용하여 지역별로 분할하여 계산함으로써, 계통연계 하에서 다수의 전력회사가 참여하여 제약급전계획 수립과정을 보다 현실적으로 구현하였다. 다기간 OPF 부문제를 계산한 후, 그 결과를 바탕으로 주문제에서 결정된 발전기 기동/정지상태의 개선 여부를 검토하기 위해 Benders cut을 생성한다. 이러한 Benders cut을 이용하여 모든 제약조건을 만족하는 최적의 급전계획을 수립할 때까지 주-부문제 간 반복연산을 수행한다. 본 논문에서 제안한 알고리즘은 2단계 최적화를 통해 문제의 차원을 축소함으로써, 보다 효율적으로 제약 급전계획을 수립할 수 있도록 한다.

## 2. 제약급전계획 문제의 정식화

제약급전계획 문제는 급전대상기간 동안 전체 계통의 운전 비용을 최소화하는 최적화 문제로 정식화되며, 매 시간대별로 예측된 전력수요에 대해 계통운전 시 요구되는 다양한 제약 조건들을 반영한 각 발전기의 최적 발전출력을 도출한다.

제약급전계획 문제의 목적함수는 모든 발전기의 연료비용과 기동비용의 합으로 정의된다. 이 때, 발전기의 기동비용은 발전기 정지시간의 함수로 주어진다.

$$\text{minimize } TC = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M [y_m(t)FC_m(p_m(t)) + SC_m(t)] \quad (1)$$

이 때, 임의의 시간  $t$ 에서 발전량  $p_m(t)$ 에 대한 연료비용은 일반적으로  $n$ 차로 근사화된 발전비용함수에 의해 해당 발전기의 연료비용을 계산한다. 본 논문에서는 다음과 같은 2차 발전비용함수를 이용한다.

$$FC_m(p_m(t)) = a_m + b_m p_m(t) + c_m p_m^2(t) \quad (2)$$

한편, 발전기의 기동비용은 발전기 정지시간의 함수로 주어진다. 본 논문에서는 다음과 같이 정의되는 기동비용함수를 이용한다.

$$SC_m(t) = \alpha_m + \beta_m (1 - e^{-X_m^{off}(t)/\tau_m}) \quad (3)$$

이러한 제약급전계획 문제는 다양한 정적/동적 제약조건을 고려한다. 우선 수급균형제약은 매 시간별 각 모선에 대한 전력조류방정식으로 정의된다. 보다 상세한 결과를 도출하기 위해 AC 전력조류계산 모형을 이용할 수 있지만, 이와 같은 경우 제약급전계획 모형의 비선형성이 심화되어 해의 수렴성이 저하되며 또한 매우 많은 제어변수로 인해 급전계획 문제의 계산이 상당히 복잡해진다. 또한, 제약급전계획 문제는 주로 실제 계통운전 이전에 일정 기간 동안의 유효 전력 출력배분 정보를 얻기 위한 선행계획(pre-dispatch schedule)을 수립하는 것을 목적으로 하기 때문에, 무효전력 제어와 같이 실제 계통운전과 관련된 정확한 결과를 반영하는 것은 큰 의미를 갖지 않는다[23]. 따라서 본 논문에서는 안정적인 해의 수렴성을 보장함과 동시에 보다 신속한 계산을 위해 다음과 같이 DC 전력조류계산 모형을 이용한다[1].

$$\sum_{m \in \Omega_i} p_m(t) - D_i(t) - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N B_{ij}(\delta_i(t) - \delta_j(t)) = 0, \quad \text{for } \forall i \in N, \forall t \in T \quad (4)$$

각 급전시간에서의 순동예비력 요구량에 대한 제약은 다음과 같다. 이는 약간의 변형을 통해 보다 정밀하게 정식화될 수 있다.

$$\sum_{m=1}^M y_m(t) P_m^{\max} \geq \sum_{i=1}^N D_i(t) + RS(t), \quad \text{for } \forall t \in T \quad (5)$$

각 발전기는 해당 급전시간에서의 기동/정지 여부에 따라 다음과 같이 발전출력의 상/하한이 결정된다.

$$y_m(t) P_m^{\min} \leq p_m(t) \leq y_m(t) P_m^{\max}, \quad \text{for } \forall m \in M, \forall t \in T \quad (6)$$

각 선로의 송전용량제약은 다음과 같이 표현된다.

$$-L_{ij} \leq B_{ij}(\delta_i(t) - \delta_j(t)) \leq L_{ij}, \quad \text{for } \forall i, j \in N, i \neq j, \text{ and } \forall t \in T \quad (7)$$

또한, 급전계획 문제는 급전기간 동안의 발전기 운전과 관련된 동적 제약조건을 고려해야 한다. 이와 관련된 발전기 최소 기동/정지시간제약은 다음과 같이 정식화된다.

$$(X_m^{on}(t-1) - MUT_m)(y_m(t-1) - y_m(t)) \geq 0, \quad (8)$$

$$(X_m^{off}(t-1) - MDT_m)(y_m(t) - y_m(t-1)) \geq 0, \\ \text{for } \forall m \in M, \forall t \in T \quad (9)$$

발전기의 증/감발율은 다음과 같이 급전시간  $t$ 와  $t-1$  간의 발전출력을 제한한다.

$$p_m(t) - p_m(t-1) \leq RUR_m, \quad (10)$$

$$p_m(t-1) - p_m(t) \leq RDR_m, \quad \text{for } \forall m \in M, \forall t \in T \quad (11)$$

### 3. Benders 분해기법의 적용

위에서 보여주고 있는 바와 같이, 제약급전계획 문제는 결과적으로 발전기의 기동/정지상태와 관련된 이진변수와 최적 계통운전 상태와 관련된 연속변수를 포함하는 대규모 혼합정수계획(MIP) 문제로 정식화된다. 이러한 MIP 문제는 이진변수와 연속변수를 동시에 결정해야 하기 때문에, 계산이 매우 복잡하고 해의 수렴성 또한 보장하기 어렵다. 이를 해결하기 위한 효율적인 방법 가운데 하나가 generalized Benders decomposition(GBD) 기법이다. GBD 기법은 이진변수와 연속변수가 연결된 결합제약조건(coupling constraints)을 제거하여, 원문제를 이진변수에 대한 주문제(master problem)와 연속변수에 대한 부문제(subproblem)로 분리한다. 이 때, 결합제약조건을 제거하는 대신 해당 결합제약조건에 대한 Benders cut을 주문제에 추가한다. 주문제는 이러한 Benders cut을 포함하여 이진변수값을 결정하여 이를 부문제에 전송하며, 부문제는 주어진 이진변수값의 수정여부를 검토하며 이를 바탕으로 Benders cut을 생성하여 주문제로 전송한다. 이러한 반복연산과정은 해가 수렴될 때까지 반복된다.

따라서 GBD 기법을 급전계획 문제에 적용하면, 원문제는 다음과 같이 각 발전기의 운전, 기동 및 정지 계획을 결정하는 기동정지계획(UC) 주문제와 해당 급전기간 동안 주어진 발전기 기동/정지상태 하에서의 다기간 최적조류계산(inter-temporal OPF) 부문제로 분리될 수 있다[22].

#### 3.1 주문제의 정식화

급전계획 주문제는 다음과 같은 발전기 기동정지계획(UC) 문제로 정식화 할 수 있다.

$$\text{minimize } Z^k + \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M SC_m(t) \quad (12)$$

subject to

$$Z^k \geq \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M y_m^k(t) FC_m(p_m^k) + \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \xi_m^k(t) [y_m(t) - y_m^k(t)], \\ \text{for } \forall k \in K \quad (13)$$

$$\sum_{m=1}^M y_m(t) P_m^{\max} \geq \sum_{i=1}^N D_i(t) + RS(t), \quad \text{for } \forall t \in T \quad (14)$$

$$\sum_{m=1}^M y_m(t) P_m^{\min} \leq \sum_{i=1}^N D_i(t), \quad \text{for } \forall t \in T \quad (15)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{m \in Y_1^k} y_m(t) - \sum_{t=1}^T \sum_{m \in Y_0^k} y_m(t) \leq |Y_1^k| - 1, \quad \text{for } \forall k \in K \quad (16)$$

$$(X_m^{\text{on}}(t-1) - MUT_m)(y_m(t-1) - y_m(t)) \geq 0, \quad (17)$$

$$(X_m^{\text{off}}(t-1) - MDT_m)(y_m(t) - y_m(t-1)) \geq 0, \\ \text{for } \forall m \in M, \forall t \in T \quad (18)$$

식 (13)은 Benders cut을 의미하며, 이는 다기간 최적조류계산 부문제에서 계산된 총 운전비용보다 낮은 값을 도출할 수 있도록 주문제의 해공간(solution space)을 축소시킨다. 이 때, 발전기의 상태변화(기동 또는 정지)가 계통 운전비용에 어느 정도의 영향을 미치는가에 대한 평가가 반영되어야 한다. 일반적으로 Benders cut은 결합제약조건과 관련된 쌍대(dual)변수값을 이용하여 해를 개선하기 위한 관련 정보를 제공하지만, 제약급전계획 문제에서 이진변수에 대한 쌍대변수값을 그대로 적용하면 이는 단지 해당 발전기의 상태변화가 전체 계통운전비용에 미치는 영향만을 반영할 뿐 송전망에 대한 물리적 제약에 대한 영향은 반영할 수 없게 된다. 따라서 본 논문에서는 다음과 같이 각 발전기의 연료비용에서 해당 발전기의 출력과 모선증분비용의 곱을 뺀 값을 기동/정지 여부를 결정하기 위한 지수로 이용함으로써 송전망제약을 반영하고자 한다. 이는 송전전력의 제한으로 인해 발생하는 모선증분비용의 차이가 각 발전기의 기동/정지상태의 결정에 서로 다른 기준을 제공하기 때문에, 간접적으로 송전망제약에 대한 영향을 반영할 수 있도록 한다.

$$\xi_m^k(t) = \begin{cases} FC_m(p_m^k(t)) - \rho_i^k(t) p_m^k(t) & \text{if } y_m^k(t) = 1 \\ FC_m(P_m^{\min}) - \rho_i^k(t) P_m^{\min} & \text{if } y_m^k(t) = 0 \end{cases}, \quad \text{for } m \in \Omega_i \quad (19)$$

이전 반복연산단계의 시간  $t$ 에서 기동중인 발전기  $m$ 이 정지된다면, 해당 발전기의 발전량은 계통 내 다른 발전기들에 배분된다. 이로 인한 운전비용의 증가는  $\rho_i^k(t) p_m^k(t)$  항에 의해 표현된다. 발전비용과 이에 대한 차이는 계통운전비용의 감소 또는 증가에 대한 근사값이 된다. 한편, 이전 반복연산단계의 시간  $t$ 에서 정지되어 있는 발전기에 대해서는 정확한 발전량에 대한 평가가 어렵기 때문에 해당 발전기의 최소출력에 대한  $\xi_m^k(t)$ 를 계산한다. 결과적으로, 각 발전기의 기동 또는 정지상태와 상관없이  $\xi_m^k(t)$ 의 값은 해를 개선하기 위한 해당 발전기의 운전상태변화 여부를 결정한다. 즉,  $\xi_m^k(t)$ 이 양의 값을 가질 경우 해당 발전기를 정지시키는 것이 보다 경제적이며, 만약 음의 값을 가질 경우에는 기동시키는 것이 경제적인 계통운전을 가능하게 한다. 이러한 지수  $\xi_m^k(t)$ 는 다기간 최적조류계산 부문제의 해를 바탕으로 도출된다.

만약 시간  $t$ 에서 기동되는 발전기의 최소출력의 합이 해당 시간에서의 부하수요보다 클 경우에는 정상적인 계통운전이 불가능하게 된다. 식 (14)와 식 (15)는 주문제의 해가 계통운전을 가능하도록 하기 위한 feasibility cut을 의미한다. 식 (16)의 제약조건은 integer cut이라 하며, 이전 반복연산에서 도출되었던 이진변수값의 조합이 다시 반복되어 계산되는 것을 방지한다.

#### 3.2 부문제의 정식화

제약급전계획 부문제는 주문제에서 결정된 발전기 기동/정지상태에 대해 송전계통을 고려하여 해당 급전기간 동안의 최적 계통운전상태를 도출하는 것을 목적으로 한다. 따라

서 급전계획 부문제는 다기간 최적조류계산 문제로 정의된다. 이러한 다기간 최적조류계산 부문제의 해는 주문제에서 결정된 발전기 기동/정지상태가 적합한 지 여부에 대한 한계적인 정보를 제공한다.  $k$ 번째 반복연산 단계에서의 다기간 최적조류계산 부문제는 다음과 같이 정식화된다.

$$\text{minimize } TC^k = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M [y_m^{k-1}(t)FC_m(p_m(t)) + SC_m^{k-1}(t)] \quad (20)$$

subject to

$$\sum_{m \in \Omega_i} y_m^{k-1}(t)p_m(t) - D_i(t) - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N B_{ij}(\delta_i(t) - \delta_j(t)) = 0, \quad \text{for } \forall i \in N, \forall t \in T \quad (21)$$

$$y_m^{k-1}(t)P_m^{\min} \leq p_m(t) \leq y_m^{k-1}(t)P_m^{\max}, \quad \text{for } \forall m \in M, \forall t \in T \quad (22)$$

$$-L_{ij} \leq B_{ij}(\delta_i(t) - \delta_j(t)) \leq L_{ij}, \quad \text{for } \forall i, j \in N, i \neq j, \text{ and } \forall t \in T \quad (23)$$

$$y_m^{k-1}(t)y_m^{k-1}(t-1)(p_m(t) - p_m(t-1)) \leq RUR_m, \quad (24)$$

$$y_m^{k-1}(t-1)y_m^{k-1}(t)(p_m(t-1) - p_m(t)) \leq RDR_m, \quad \text{for } \forall m \in M, \forall t \in T \quad (25)$$

### 3. 계산 절차

제약급전계획 문제는 주-부문제 간 반복연산과정을 통해 최적해를 도출한다. 임의의 반복연산단계에서 주어진 주문제의 발전기 운전상태에 대해, 다기간 최적조류계산 부문제를 수행하며 그 결과를 바탕으로 Benders cut을 생성하여 주문제에 추가한다. 기동정지계획 주문제는 추가된 Benders cut을 고려하여 발전기 기동정지계획을 재수립하며 그 결과를 부문제로 다시 전송한다. 이러한 과정은 주문제의 목적함수값이 해당 반복연산단계까지 계산된 부문제의 최소운전비용보다 커질 때까지 반복된다. 이를 요약하면 다음과 같다.

- Step 0: 초기화  
이진변수에 대한 초기값을 설정한다. 본 논문에서는 첫 번째 부문제의 실행가능성을 보장하기 위해, 식 (14)와 식 (15)의 feasibility cut을 만족하는 발전기 운전조합 가운데 가장 많은 발전기를 기동하는 결과를 초기 시작점 즉, 제약급전계획 문제의 초기해로 이용한다.
- Step 1: 부문제의 계산  
주어진 발전기 기동/정지상태에 대한 다기간 OPF 부문제를 수행한다. 본 논문에서는 지역분할기법을 이용하여 다기간 OPF 부문제의 병렬연산을 수행한다.
- Step 2: Benders cut 생성  
제약급전계획 부문제의 결과를 바탕으로 식 (19)를 이용하여 식 (13)과 같은 Benders cut을 생성한다. Benders cut은 매 반복연산마다 누적되어 주문제에 추가된다.
- Step 3: 주문제의 계산  
부문제를 통해 생성된 Benders cut을 고려하여 UC 주문제를 계산한다.
- Step 4: 수렴 판정  
부문제에서 계산한 목적함수값과 주문제에서 계산한 목적함수값을 비교한다. 만약, 주문제의 목적함수값이 부문제의 목적함수값보다 작거나 같다면 계산을 종료하며 해당

반복연산단계에서 결정된 이진변수값 및 연속변수값이 제약급전계획의 최적해가 된다. 그렇지 않으면, 주문제에서 결정된 이진변수값을 바탕으로 Step 2를 반복한다.

이에 대한 흐름도는 <그림 1>과 같다.

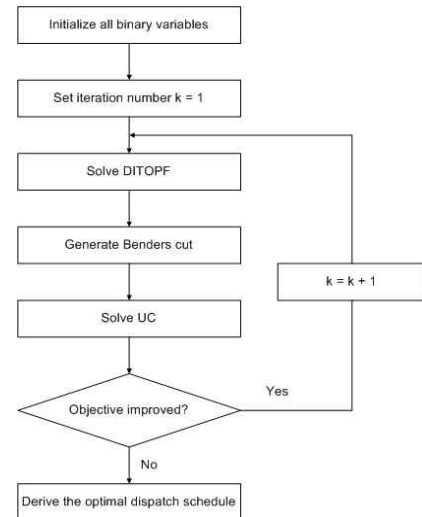


그림 1 급전계획 알고리즘 흐름도

Fig. 1 Flowchart for the proposed dispatch scheduling algorithm

### 4. 지역분할기법을 이용한 다기간 최적조류계산

제약급전계획 부문제에서 발전기의 증/감발제약을 고려하지 않는다면, 이는 각 시간대별 일반적인 최적조류계산(OPF) 문제로 분리될 수 있다. 이와 같이 부문제를 분리할 경우, 문제의 차원이 상당히 축소되기 때문에 해의 수렴성을 개선할 수 있다. 또한 분리된 부문제들은 각 급전시간에 대해 서로 독립적인 문제로 정의되므로, 병렬처리기법을 통해 계산효율을 보다 향상시킬 수 있다. 그러나 발전기의 증/감발제약은 시간 연속적으로 계통운전을 제한하기 때문에, 다기간 최적조류계산의 분리를 어렵게 한다. 이는 결과적으로 급전계획 부문제를 단 하나의 대규모 비선형계획문제로 계산해야 하기 때문에, 해를 도출하기 위해 상당한 연산시간을 필요로 하며 해의 수렴성 또한 상당히 저하된다. 본 논문에서는 지역분할기법을 기반으로 하는 다기간 최적조류계산 알고리즘을 제안한다. 이는 대규모 급전계획 부문제를 단순히 지역에 따라 분리하여 분할된 각 지역에 대한 다기간 최적조류계산을 개별적으로 수행한 다음, 최적해에 도달할 때까지 그 계산을 반복 수행한다. 본 논문에서 제안된 지역분할기법은 ADM 알고리즘을 기반으로 한다. 이 ADM 알고리즘은 각 지역별로 분리된 다기간 OPF 문제의 augmented Lagrangian 함수를 직접 이용하기 때문에, 근사화된 augmented Lagrangian 함수를 이용하는 다른 분산처리기법에 비해 계산속도가 빠르면서도, 이를 연계계통에 적용할 경우에는 각 지역의 전력사업자가 운전비용과 관련된 자신의 고유정보를 외부에 공개하지 않고서도 다른 지역과의 전력거래를 포함한 가장 경제적인 급전계획을 수립할 수 있도록 한다.

### 4.1 가상발전기의 도입

전체 계통을 지역적으로 분할하여 다기간 최적조류계산을 수행하기 위해서는 분할된 지역의 경계모선에 가상발전기(dummy generator)를 도입해야 한다. 이러한 가상발전기는 전력을 생산하거나 소비하는 역할을 하는 하나의 경제주체로서, 자신이 연결되어 있는 모선의 잠재비용에 따라 발전량을 결정한다. 그 결과, 가상발전기는 해당 지역계통의 외부에서 미치는 영향을 반영한다. 이는 분리된 각 지역에 대한 최적조류계산을 수행한 다음, 인접 지역의 경계모선에서의 가격 정보를 교환하여 제약조건의 Lagrange 승수를 반복적으로 개선함으로써 해를 도출한다.

가상발전기를 이용한 지역분할기법은 <그림 2>에서 보여주고 있는 바와 같이, 분할하고자 하는 지역의 경계를 하나의 연계선으로 연결된 두 개의 가상모선으로 나누어 각 모선에 가상발전기를 투입하는 것이다. 여기서,  $x_A$ 와  $x_B$ 는 분리된 각 지역 내부의 계통변수를 나타내며,  $d$ 는 경계지역의 가상모선과 관련된 경계변수를 나타낸다. 본 논문에서는 DC 전력조류계산 모형을 이용하기 때문에, 이 경계변수는 매 시간별 가상모선으로 유입되는 유입전력과 그 위상각을 포함한다.

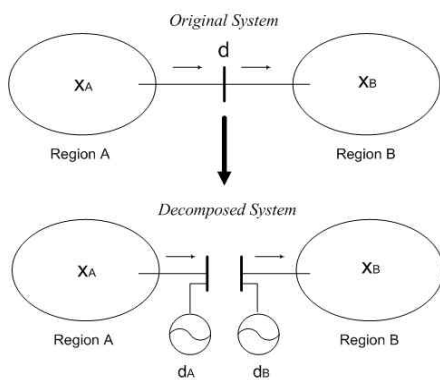


그림 2 가상발전기를 이용한 경계모선의 분할  
Fig. 2 Regional decomposition using dummy generators

이러한 경계변수는 각각의 분할된 지역에 대해 복사(duplication)되며, 복사된 두 변수 간의 논리를 유지하기 위한 결합제약조건(consistency constraints)이 추가된다. 위 그림에서와 같이 A 지역의 경계변수를  $d_A$ , B 지역의 경계변수를  $d_B$ 라고 하면 해당 경계모선의 계통변수값은 모두 동일해야 하므로,  $d_A = d_B$ 라는 결합제약조건이 부과되어야 한다. 그 결과, A 지역과 B 지역에 대한 최적조류계산의 상태변수는 각각  $(x_A, d_A)$ 와  $(x_B, d_B)$ 으로 정의된다. 이를 바탕으로, 전체 계통에 대한 최적조류계산 문제의 augmented Lagrangian 함수를 정식화하면 다음과 같다.

$$\underset{\substack{(x_A, d_A) \\ (x_B, d_B)}}{\text{minimize}} \left\{ c_A(x_A) + c_B(x_B) + \lambda(d_A - d_B) + \frac{\gamma}{2} \|d_A - d_B\|^2 \right\},$$

for  $\gamma \geq 0$  (26)

단,  $\lambda$ 는 Lagrange 승수를 나타내며,  $\gamma$ 는 임의의 상수를 나타낸다. 위 식의 2차 항은  $d_A = d_B$ 가 되는 최적해에는 영향

을 미치지 않지만 해의 수렴성을 향상시키는 역할을 하는 penalty 항을 의미한다.

### 4.2 Alternating Direction Method의 적용

위의 식 (26)과 같은 함수를 이용한 augmented Lagrangian relaxation(ALR) 기법은 2차 penalty 항을 추가하여 최적화 문제의 convexity를 보장함으로써 Lagrangian relaxation(LR) 기법에 비해 해의 수렴성을 향상시키는 반면, 이로 인해 문제의 분할을 어렵게 한다. 이를 해결하기 위한 방법 가운데 하나인 ADM 알고리즘은 해당 지역의 제어변수를 제외한 다른 모든 변수를 고정함으로써 그 지역에 대한 OPF 문제를 계산하며, 이를 통해 도출된 결과를 바탕으로 다른 지역에 대해 순차적으로 동일한 최적화를 진행함으로써 원문제의 지역별 분할을 가능하게 한다. 이 때문에 ADM 알고리즘은 비선형 Gauss-Seidel 기법이라고도 한다. ADM은 순차적 최적화 기법이라는 점에서 auxiliary problem principle(APP) 등과 같은 다른 분산처리기법에 비해 병렬연산의 응용성(parallel implementation)은 취약하지만, 해의 수렴속도가 다른 분산처리 알고리즘에 비해 상대적으로 빠르다.

예를 들어, <그림 2>와 같이 2개의 지역으로 분할되는 계통에 대한 다기간 OPF 문제에 ADM 알고리즘을 적용하면 최적해는 다음과 같은 반복연산과정을 통해 도출된다.

- Step 1: 제약 급전계획 문제의 초기화(initialization).
- Step 2: A 지역에 대한 다기간 OPF 문제 계산.
 
$$(x_A^{k+1}, d_A^{k+1}) = \underset{(x_A, d_A)}{\text{minimize}} \left\{ c_A(x_A) + \frac{\gamma}{2} \|d_A - d_B^k\|^2 + \lambda^k d_A \right\}.$$
- Step 3: B 지역에 대한 다기간 OPF 문제 계산.
 
$$(x_B^{k+1}, d_B^{k+1}) = \underset{(x_B, d_B)}{\text{minimize}} \left\{ c_B(x_B) + \frac{\gamma}{2} \|d_B - d_A^k\|^2 - \lambda^k d_B \right\}.$$
- Step 4: 결합 제약조건의 Lagrange multiplier 갱신.
 
$$\lambda^{k+1} = \lambda^k + \alpha(y_A^{k+1} - y_B^{k+1}).$$
- Step 5: 해가 수렴될 때까지 위의 단계 2에서 4를 반복.

## 5. 사례연구

본 논문에서 제안한 알고리즘을 검증하기 위해, 50모선 예제계통에 대한 급전계획을 수립하였다. 이 계통은 총 28대의 발전기와 80개의 송전선로로 구성되어 있으며, 급전계획기간은 12시간으로 가정하였다. 또한 전체 계통은 2개의 지역으로 분리되며, 각 지역 간에는 2개의 경계모선이 존재한다. 각 지역계통은 IEEE Reliability Test System 24모선을 변형하여 적용하였다. 한편, 발전비용은 B지역이 A지역보다 1.4배 정도 높은 것으로 가정하였다. <그림 3>과 같은 시간대별 부하패턴을 갖는 예제계통의 급전계획 수립을 위해, GAMS 최적화 모형[24]을 이용하여 제안된 알고리즘을 구현하였다.

그 결과, 50모선 예제계통에 대한 급전계획 문제는 <그림 4>에서 보여주고 있는 바와 같이 6회의 주-부문제 간 반복연산 후에 최적해를 도출하였다. 한편 <그림 5>는 예제계통에 대한 급전계획 수립 결과 도출된 각 발전기의 기동/정지 상태를 나타낸다. 여기서, 그림 좌측의 기호는 각 발전기의 index를 의미한다. 앞에 2자리 숫자는 해당 발전기가 위치한 모선번호를, 그리고 뒤의 3자리 숫자는 해당 발전기의 용량

을 나타낸다. 또한, 그림의 검정색 상자는 해당 시간에 발전기가 기동되었음을 의미한다. 그 결과, 상대적으로 연료비용이 낮고 기동비용이 높은 발전기들은 기저발전기로서 급전기간 내내 가동되며, 이와 반대로 연료비용이 높고 기동비용이 낮은 발전기들, 주로 발전비용이 가장 높은 B 지역의 발전기들(25번 이후의 모선에 위치한 발전기들)은 첨두발전기로서 계통 수급균형 유지를 위해 기동/정지를 반복한다. 특히, 가장 발전비용이 높은 발전기 39BU12의 경우에는 가동조차 하지 않고 있음을 확인할 수 있다.

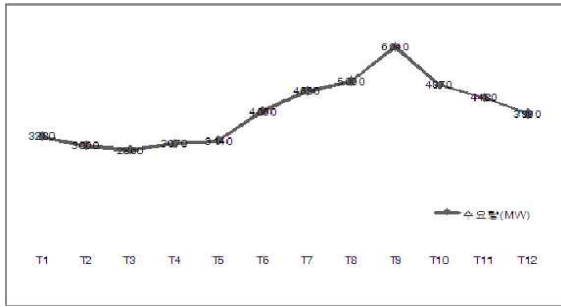


그림 3 시간대별 부하패턴  
Fig. 3 Hourly load pattern

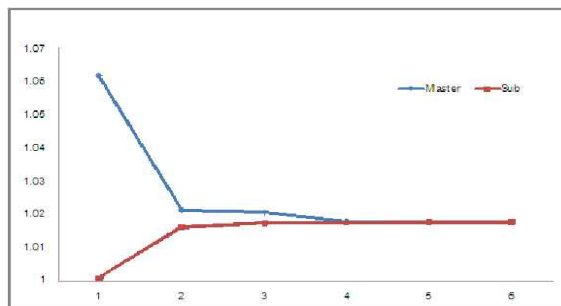


그림 4 주-부문제 간 최적해 수렴과정  
Fig. 4 Convergence procedure between MP and SPs

ADM 기반 분산처리 OPF를 이용한 급전계획 알고리즘의 타당성을 검토하기 위해, 위의 결과와 중앙처리 최적조류계산을 이용하여 도출된 급전계획 결과를 비교하면 <표 1>과 같다. 그 결과, 분산처리 OPF를 이용한 결과는 일반적인 GBD 기반 급전계획 알고리즘의 결과와 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있다. 이는 지역분할기법을 기반으로 하는 분산처리 OPF 부분제의 분할이 발전기의 기동/정지상태의 변화를 나타내는 이진변수의 최적값 도출에는 아무런 영향을 미치지 않음을 시사한다. 반면, 운전비용, 각 발전기의 출력 및 계통운전 상태를 나타내는 연속변수값에는 약간의 차이를 발생한다. 이는 분산처리 OPF를 위해 적용한 ADM 알고리즘이 각각의 분할된 문제에서 도출된 다른 지역에 대한 연속변수의 근사값을 이용하는 과정에서 그 정확성을 일부 상실하기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 ADM 기반 분산처리 최적조류계산으로 도출한 운전비용은 중앙처리 최적조류계산을 이용한 결과에 비해 약 0.00079% 정도의 차이를 보일 뿐임을 확인할 수 있다. 그 결과, ADM 기반 분산처리 최적조류계산을 이용한 제약급전계획 알고리즘의 지역별 분할이 급전계획의 정확성

을 크게 상실하지 않는 것으로 판단할 수 있으며, 결과적으로 이를 통해 연계계통의 제약급전계획 알고리즘으로서의 적용가능성을 시사하고 있음을 확인할 수 있다. 한편, 이러한 연속변수값의 오차수준은 결합제약조건에 허용오차 범위나 augmented Lagrangian 함수의 파라미터값을 어떻게 설정하는가에 따라 달라질 수 있음에 주의한다.

표 1 총 계통운전비용 계산 결과

Table 1 Comparison of operating costs between conventional and proposed OPF application

	Centralized	Distributed	Error (%)
Total Cost (\$)	1,017,645	1,017,653	0.00079%
Start-up Cost (\$)	293.3	293.3	-

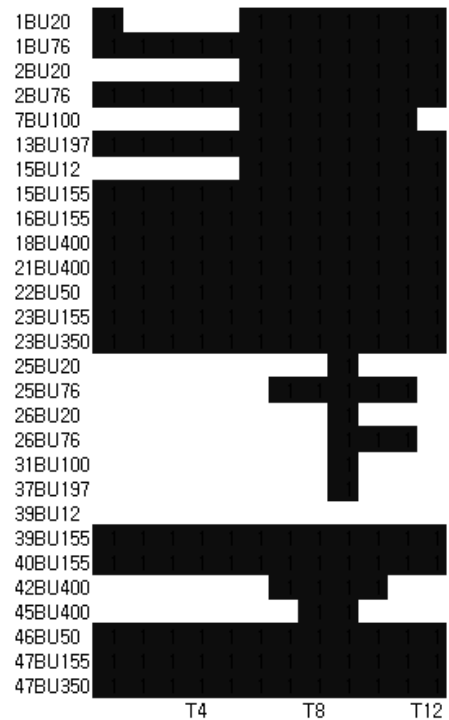


그림 5 시간대별 각 발전기의 기동/정지상태  
Fig. 5 Optimal hourly UC schedule

6. 결론

본 논문에서는 이와 같은 대규모 MIP 문제로 정식화되는 급전계획 문제를 수행하기 위한 효율적인 방법으로 GBD 기법을 기반으로 하는 급전계획 알고리즘을 제안하였다. GBD 기법은 원문제는 주-부문제의 2단계 구조로 분해하기 때문에, 보다 단순한 형태로 문제를 구현하여 신속하고 정확하게 최적해를 도출할 수 있음을 확인하였다. 한편, 시간 연속성을 고려한 수많은 계통변수와 제약조건으로 인해 매우 복잡한 고차원 최적화 문제로 정의되는 다기간 최적조류계산 문제를 보다 효율적으로 수행하기 위해 ADM 알고리즘을 기반으로 하는 지역분할기법을 도입하였다. 이러한 지역분할

기본 다기간 분산처리 OPF 알고리즘을 연계계통에 적용할 경우에는 각 지역의 전력회사가 운전비용과 관련된 자신의 고유 사업정보를 외부에 공개하지 않고서도 다른 지역과의 전력거래를 포함한 가장 경제적인 급전계획을 수립할 수 있기 때문에, 계통연계 환경 하에서 보다 적합한 형태로 급전계획을 수립할 수 있도록 한다.

## 7. 기호정리

본 논문에서 사용하는 기호는 다음과 같다.

$TC$	: 총 계통운전비용
$TC^k$	: $k$ 번째 반복연산에서의 총 계통운전비용
$Z^k$	: $k$ 번째 반복연산에서 기동/정지계획 문제의 발전비용을 근사화하는 연속변수
$FC_m(p_m(t))$	: 시간 $t$ 에서 발전기 $m$ 의 출력 $p_m(t)$ 에 대한 연료비용
$SC_m(t)$	: 시간 $t$ 에서 발전기 $m$ 의 기동비용
$y_m(t)$	: 시간 $t$ 에서 발전기 $m$ 의 기동/정지상태 (1 또는 0)
$y_m^k(t)$	: $k$ 번째 반복연산의 문제에서 주어진 변수 $y_m(t)$ 의 상수값
$p_m(t)$	: 시간 $t$ 에서 발전기 $m$ 의 발전출력
$P_m^{\min}$	: 발전기 $m$ 의 최소 발전출력
$P_m^{\max}$	: 발전기 $m$ 의 최대 발전출력
$D_i(t)$	: 시간 $t$ 에서 모선 $i$ 의 부하수요
$RS(t)$	: 시간 $t$ 에서의 계통 순동예비력 요구량
$\xi_m^k(t)$	: $k$ 번째 반복연산의 부문제를 통해 도출된 시간 $t$ 에서 발전기 $m$ 의 기동/정지 결정지수
$\rho_i^k(t)$	: $k$ 번째 반복연산의 부문제를 통해 도출된 시간 $t$ 에서 모선 $i$ 의 증분비용
$B_{ij}$	: 모선 $i$ 와 $j$ 를 연결하는 송전선로의 서셉턴스
$L_{ij}$	: 모선 $i$ 와 $j$ 를 연결하는 송전선로의 최대선로용량
$\delta_i(t)$	: 시간 $t$ 에서 모선 $i$ 의 위상각
$\alpha_m, \beta_m$	: 발전기 $m$ 의 기동비용계수
$\tau_m$	: 발전기 $m$ 의 보일러 냉각속도에 대한 시정수 (time constant)
$X_m^{on}(t)$	: 시간 $t$ 까지 발전기 $m$ 이 기동되어 있는 시간
$X_m^{off}(t)$	: 시간 $t$ 까지 발전기 $m$ 이 정지되어 있는 시간
$MUT_m$	: 발전기 $m$ 의 최소기동시간
$MDT_m$	: 발전기 $m$ 의 최소정지시간
$RUR_m$	: 발전기 $m$ 의 증발율
$RDR_m$	: 발전기 $m$ 의 감발율
$T$	: 총 급전시간
$M$	: 총 급전대상 발전기의 수
$N$	: 총 계통모선의 수
$\Omega_i$	: 모선 $i$ 에 위치한 모든 발전기의 집합
$Y_0^k$	: $k$ 번째 반복연산에서 정지되는 발전기의 집합
$Y_1^k$	: $k$ 번째 반복연산에서 기동되는 발전기의 집합
$ Y_1^k $	: $k$ 번째 반복연산에서 기동되는 발전기의 수

## 참고 문헌

- [1] A. J. Wood and B. F. Wollenberg, *Power Generation, Operation, and Control: 2nd Edition*, John Wiley & Sons, 1996.
- [2] X. Guan, R. Baldick, and W. H. Edwin Liu, "Integrating power system scheduling and optimal power flow," *12th Power System Computation Conference*, Dresden, Aug. 1996.
- [3] J. Batut and A. Renaud, "Daily generation scheduling optimization with transmission constraints: A new class of algorithms", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, no. 3, pp. 982-987, August, 1992.
- [4] C. Beltran and F. J. Heredia, "Unit commitment by augmented Lagrangian relaxation: Testing two decomposition approaches", *Journal of Optimization Theory and Applications*, vol. 112, no. 2, pp. 295-314, February, 2002.
- [5] J. F. Benders, "Partitioning procedures for solving mixed variables programming problems," *Numerische Mathematik*, vol. 4, no. 1, pp. 238-252, December, 1962.
- [6] A. M. Geoffrion, "Generalized Benders decomposition", *Journal of Optimization Theory and Application*, vol. 10, no. 4, pp. 237-260, October, 1972.
- [7] S. M. Shahidehpour and Y. Fu, "Benders decomposition: Applying Benders decomposition to power systems", *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 3, no. 2, pp. 20-21, March/April, 2005.
- [8] H. Ma and S. M. Shahidehpour, "Transmission-constrained unit commitment based on Benders decomposition", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 20, no. 4, pp. 287-294, May, 1998.
- [9] N. Alguacil and A. J. Conejo, "Multiperiod optimal power flow using Benders decomposition", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, no. 1, February, 2000.
- [10] Y. Y. Hong and M. T. Weng, "Optimal short-term real power scheduling in a deregulated competitive market", *Electric Power Systems Research*, vol. 54, no. 3, pp. 181-188, June, 2000.
- [11] E. Kuan, O. Ano, and A. Vargas, "Unit commitment optimization considering the complete network modeling", *2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings*, vol. 3, 10-13 September, 2001.
- [12] H. Yamin, S. Al-Agtash, and S. M. Shahidehpour, "Security-constrained optimal generation scheduling for GENCOs", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 3, pp. 1365-1372, August, 2004.
- [13] L. Bo and S. M. Shahidehpour, "Unit commitment with flexible generating units", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 2, pp. 1079-1088, May, 2005.
- [14] Y. Fu, S. M. Shahidehpour, and Z. Li, "Security-constrained unit commitment with AC constraints", *IEEE Transactions on*

*Power Systems*, vol. 20, no. 3, pp. 1538-1550, August, 2005.

- [15] J. Martinez-Crespo, J. Usaola, and J. L. Fernandez, "Security-constrained optimal generation scheduling in large-scale power systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 1, pp. 321-332, February, 2006.
- [16] B. H. Kim and R. Baldick, "Coarse-grained distributed optimal power flow", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 12, no. 2, pp. 932-939, May, 1997.
- [17] R. Baldick, B. H. Kim, C. Chase, and Y. Luo, "A fast distributed implementation of optimal power flow", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, no. 3, pp. 858-864, August, 1999.
- [18] B. H. Kim and R. Baldick, "A comparison of distributed optimal power flow algorithms", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, no. 2, pp. 599-604, May, 2000.
- [19] J. Eckstein, "Parallel alternating direction multiplier decomposition of convex programs," *Journal of Optimization Theory and Applications*, vol. 80, no. 1, pp. 39-63, January 1994.
- [20] D. Garby and B. Mercier, "A dual algorithm for the solution of nonlinear variational problems via finite-element approximation," *Comp. Math. Appl.*, vol. 2, pp. 17-40, 1976.
- [21] K. H. Chung, B. H. Kim, and K. B. Song, "Implementing distributed optimal power flow using the alternating direction method," *KIEE International Transactions on Power Engineering*, 5A(4), pp. 412-415, Dec. 2005.
- [22] 정구형, 강동주, 김발호, "분산처리 최적조류계산 기반 연계계통 급전계획 알고리즘 개발", *대한전기학회 논문지*, 56A권 10호, 2007.
- [23] K. Bhattacharya, Math H. J. Bollen, and J. E. Daalder, *Operation of Restructured Power Systems*, Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [24] A. Brooke, D. Kendrick and A. Meeraus, *GAMS User's Guide*, The Scientific Press, 1990.



**김 발 호 (金發鎬)**

1962년 7월 12일생. 1984년 서울대 전기공학과 졸업. 1984~1990년 한국전력공사 기술연구본부 전력경제연구실 근무. 1992년 Univ. of Texas at Austin 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 졸업(공학). 1999년~현재 홍익대학교 전자전기제어공학부 교수  
Tel: 02-320-1462  
Fax: 02-320-1110  
E-mail: bhkim@wow.hongik.ac.kr



**이 종 주 (李種柱)**

1975년 11월 27일생. 1999년 수원대학교 전기공학과 졸업. 2001년 성균관대 정보통신공학부 대학원 졸업(석사). 2008년 동 대학원 정보통신공학부(공학). 2001~2004년 새턴정보통신(주) 개발팀장. 2005~2007년 성균관대학교 정보통신용 신기능성소재 및 공정연구소 연구원. 2008년~현재 한국전기연구원 Smart Grid 연구센터 위촉선임연구원  
Tel: 031-420-6188  
Fax: 031-420-6189  
E-mail: jongjoo@keri.re.kr



**김 학 만 (金學萬)**

1966년 2월 11일생. 1991년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1996. 10 ~ 2008. 2 한국전기연구원 전력연구단 선임연구원. 현재 인천대학교 전기공학과 교수  
Tel : 032-835-8769  
E-mail : hmkim@incheon.ac.kr

**저 자 소 개**



**정 구 형 (鄭求亨)**

1974년 9월 20일생. 2001년 홍익대학교 전기전자제어공학과 졸업. 2003년 동 대학원 전기정보제어공학과 졸업(석사). 2007년 동 대학원 전기정보제어공학과 졸업(공학). 2007년~현재 한국전기연구원 Smart Grid 연구센터 선임연구원.  
Tel: 031-420-6134  
Fax : 031-420-6139  
E-mail: kchung@keri.re.kr