

## 부하차단량을 고려한 상정사고 제약 최적조류계산 알고리즘 개발

정구형 강동주\* 김발호  
홍익대학교 \*한국전기연구원

Security Constrained Optimal Power Flow Incorporating Load Curtailment Schedule

Chung, Koohyung Kang, Dongjoo\* Kim, Balho  
Hongik Univ. \*KERI

**Abstract** - Fundamentally, success of the competitive electricity market is dependent on efficient market design. However, since electricity incorporates various physical constraints as other commodities, the resource assignment (i.e., dispatch scheduling) is also one of requisites for the successful operation of electricity market. Therefore, efficient dispatch scheduling is an important issue to succeed in the deregulated electricity market and the efficiency of this electricity market may be considerably increased by systematic studies on dispatch scheduling algorithm and corresponding constraints, especially system security. Moreover, contrary to traditional vertically-integrated electric power industry condition, since various decision-makings in deregulated electricity market are directly connected with market participants' benefits, only rational dispatch scheduling algorithm can convince these participants. Therefore, it can provide a basis of grievance prevention.

In this paper, we propose an algorithm for security constrained dispatch scheduling with respect to load curtailment. Proposed algorithm decomposes the dispatch problem into a master problem corresponding to basecase optimal power flow (OPF) and several subproblems corresponding a series of contingencies using two-stage optimization technique.

1. 서 론

최근 전력산업에의 경쟁도입에 따른 발전지역과 부하 지역 간 장거리 연계선로의 조류 증가, 우회조류의 발생, 송전 예비력 및 안정도 여유량의 감소 등으로 인해, 계통 운영 시 충분한 송전용량을 확보하는 것은 무엇보다도 중요한 문제로 되고 있다. 따라서, 효율적인 전력거래를 보장하기 위해서는 송전체계통 안전도 제약조건을 고려한 급전계획의 수립이 요구되고 있다[1].

이를 위해, 다양한 상정사고 제약조건을 반영한 최적 조류계산(OPF) 알고리즘이 개발되었다. 일반적으로 상정사고 제약조건이 추가될 경우, 계통은 보다 보수적인 방법으로 운영되기 때문에 계통 운전비용은 기본적인 OPF로 계산할 때보다 증가하게 된다. 참고문헌 [2-6]에서 제안한 상정사고 제약 OPF 알고리즘은 상정사고 시에도 계통운전이 가능하도록 하는 추가적인 제약조건을 포함하기 때문에 예방적인 수단이 될 수는 있지만, 상정사고 시 제어 설정을 변경할 수 있는 능력은 가지고 있지 않다. 상정사고 후 수정된 급전계획을 수립할 수 있도록 하는 OPF는 참고문헌 [7-10]에서 기술하였다. 상정사고 후 재급전 능력을 고려할 경우, 각각의 상정사고 시나리오는 최적화 문제로 모형화되며 그 결과 전체 문제는 상당히 고차원적인 문제로 정식화되기 때문에 분해기법의 적용을 필요로 하게 된다. 그러나, 기존의 연구는 유효전력에 대해서만 고려할 뿐만아니라 차단가능부하는 단지 문제의 실행효율성을 보장하기 위한 수동적인 역할만을 수행하였기 때문에, 자신의 차단가능부하를 이익극대화

를 위한 전략으로 사용할 수 있는 경쟁적 전력시장에서는 적합하지 않게 된다[11,12].

따라서, 본 논문에서는 급전계획 문제의 실행 가능성을 보장함과 동시에 차단 가능부하 용량제약까지 고려할 수 있는 송전계통 안전도 제약 최적조류계산(OPF) 알고리즘을 제안하고자 한다. 이를 위해, 급전계획 문제는 Benders 분해기법을 바탕으로, 송전계통 안전도 제약조건을 고려하지 않는 기본적인 OPF 문제를 계산하는 주 문제(master problem)와 다양한 상정고사 하에서 OPF 실행 가능 여부를 점검하는 일련의 부문제(subproblem)로 분해된다. 만약 주문제에서 주어진 급전계획이 송전계통 안전도 제약조건을 위반하게 되면, Benders cut를 생성하여 주문제에 삽입한다. 이와 같은 주·부문제 간 반복 연산 과정은 상정고사 후 재급전계획을 반영한 최소비용의 급전계획을 도출할 때까지 계속된다.

## 2. 문제의 점식화

일반적인 상정사고 제약조건 급전계획 문제는 다음과 같이 정식화된다.

$$\begin{aligned}
 & \text{minimize } f(x_0) \\
 & \text{subject to } g(x_0) = 0 \\
 & \quad g(x_k) = 0 \text{ for } k = 1, \dots, Nc \\
 & \quad h(x_0) \leq 0 \\
 & \quad h(x_k) \leq 0 \text{ for } k = 1, \dots, Nc \\
 & \quad |x_c - x_i| \leq \Delta x_i \text{ for } k = 1, \dots, Nc
 \end{aligned} \tag{1}$$

단,  $k$ 는 고려하고자 하는 각각의 상정사고에 대한 지수이며,  $Nc$ 는 고려하고자 하는 총 상정사고의 수이다. 또한,  $x_0$ 는 정상상태에서의 계통 제어변수 벡터이며,  $x_k$ 는  $k$ 번째 상정사고 하에서의 계통 제어변수 벡터를 나타낸다. 그리고,  $g(x_0)$ ,  $h(x_0)$ 는 정상상태에서의 계통 운전을 위한 등식 및 부등 제약조건 집합,  $g(x_k)$ ,  $h(x_k)$ 는  $k$ 번째 상정사고 하에서의 계통 운전을 위한 등식 및 부등 제약조건 집합,  $\Delta x_k$ 는  $k$ 번째 상정사고 시 허용되는 계통변수의 제어 허용범위 벡터를 나타낸다.  $f(x)$ 는 모든 발전기의 발전비용에 대한 합으로 정의되며, 상정사고 제약 급전계획은 정상상태에서의 총 유효 전력 발전비용을 최소화하는 것을 목적으로 한다.

결합 제약조건(coupling constraints)  $|x_0 - x_k| \leq \Delta x_k$ 는  $k$ 번째 상정사고가 발생할 경우에도 계통 운전이 가능하도록 보장하기 위해 각각의 제어변수가 변동할 수 있는 허용한계를 설정한다. 이러한 결합 제약조건은 주로 발전기의 응동동력을 고려하기 위해 정의된다. 그 결과,  $k$  번째 상정사고가 발생하게 되면, 발전기는 주어진 종/감\_hat 한계 내에서 출력을 제조적하게 된다.

### 3. 차단가능부하를 고려한 송전계통 안전도 제약 최적조류계산 문제

기존의 상정사고 시 재급전계획을 반영한 송전계통 안전도 제약 OPF 알고리즘의 경우, 계산의 실행가능성을 보장하기 위해 차단가능부하를 고려하고는 있지만 그 역할은 매우 수동적이다[7-10]. 향후 경쟁적 전력시장에서는 차단가능부하 또한 시장참여자의 이익극대화를 위한 수단으로 이용할 수 있기 때문에, 발전기와 같이 실질적인 차단가능용량에 대한 제약을 부과해야 한다. 또한 기존의 연구들은 주로 DC OPF를 기반으로 하기 때문에, 차단가능부하 또한 단지 유효전력에 대해서만 고려되었다. 그러나, 실제 계통운전 시에는 부하차단이 단지 송전선로의 열용량 제약에 의해서 수행되기보다는 계통의 전압안정도를 유지하기 위해 수행되는 경우가 많기 때문에 유효전력뿐만 아니라 무효전력의 차단효과에 대해서도 고려해야 한다. 이를 위해, 본 논문에서는 발전량뿐만 아니라 부하량 또한 제어변수로 고려한다. 이와 같은 경우, 문제의 변수가 증가하기 때문에 계산속도가 저하되는 단점이 있지만 실제로 차단가능한 부하는 전체 부하의 일부에 지나지 않기 때문에 그 영향은 크지 않다고 할 수 있다.

차단가능부하는 실제로 차단된 유효전력 용량에 대해 보상을 받기 때문에 이를 발전기와 같이 취급할 수 있다. 또한, 실제 공급되는 부하량을 제어변수로 고려하기 때문에 등식 제약조건 즉, 전력조류방정식의 유효/무효전력 부하는 고정된 파라미터가 아닌 변수로 적용된다. 그리고, 유효전력 차단가능용량에 대한 제약조건 또한 계통 제약조건의 일부로써 추가되어야 한다.

임의의 모선에서 특정한 유효전력 부하량이 차단될 경우, 무효전력 부하량을 어느 정도 삐감할 것인가는 차단되는 설비의 실제 무효전력 부하량에 좌우된다. 그러나 다양한 설비에 대한 무효전력 부하량에 대한 정보를 고려할 경우 무효전력 부하량 변수의 연속성을 보장할 수 없다. 따라서, 본 논문에서는 일정한 부하역률을 유지하기 위해 특정량의 유효전력 부하가 차단될 경우, 해당 무효전력 부하 또한 동일한 비율로 차단된다고 가정한다. 그 결과, 무효전력 부하량은 유효전력 부하량에 대한 종속변수로 표현된다.

또한, 상정사고 발생 시 차단가능부하는 발전기와 같이 자신의 차단용량 한계 내에서 부하수요량을 제어할 수 있기 때문에, 발전기뿐만 아니라 차단가능부하에 대해서도 결합 제약조건을 정식화해야 한다.

그러나, 고려하고자 하는 상정사고의 수에 따라 매우 많은 제약조건이 문제에 추가되기 때문에 n-1 상정사고 기준 하에서 최적 급전계획 수립을 위해 이를 직접적인 방법으로 계산할 경우에는 상당한 계산시간을 소요하게 된다. 또한, 제약조건의 증가 및 결합 제약조건의 존재는 해의 수렴성을 상당히 저하시키는 원인이 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 본 논문에서는 Benders 분해기법을 이용한 송전계통 안전도 제약 최적조류계산 알고리즘을 제안하고자 한다.

#### 4. Benders 분해기법의 적용

위에서 기술한 송전계통 안전도 제약 급전계획 문제는 결합 제약조건을 제거하면 각각 정상상태에 대한 주문제와 Nc개의 상정사고 각각에 대한 부문제로 분해될 수 있다. Benders 분해기법은 이와 같이 결합 제약조건을 제거함으로써 원문제를 주-부문제 간 2단계 구조로 구현할 수 있도록 한다[13]. 그러나, 결합 제약조건을 제거하는 대신 Benders cut이라고 하는 추가적인 제약조건이 주문제에 부과되어야 한다. 이는 주문제에서 결정된 변수값이 각각의 부문제에 대해 어느 정도의 영향을 미치는가에 대한 정보를 포함한다.

##### 4.1 부문제의 정식화

송전계통 안전도 제약 급전계획을 위한 부문제는 각각의 상정사고에 대해 정의된다. 따라서, Nc개의 상정사고를 고려할 경우, Nc개의 독립적인 부문제가 성립된다. k번째 상정사고에 대한 부문제는 다음과 같이 정식화된다.

$$\begin{aligned} & \text{minimize } e^T s_k \\ & \text{subject to } g(x_k) = 0 \\ & h(x_k) \leq 0 \\ & |x_0^m - x_k| - s_k \leq \Delta x_k \\ & s_k \geq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

단,  $e = [1, \dots, 1]^T$ . 또한  $x_0^m$ 은 m번째 반복연산 시 주문제에서 계산된 제어변수 값의 벡터를 나타내며  $s_k$ 는 k번째 상정사고 시 제어변수 집합 가운데 제약조건을 위반한 정도를 측정한 페널티 변수 벡터를 나타낸다. 이러한 페널티 변수는 부문제의 실행가능성을 보장하는 슬랙 변수의 역할 또한 수행한다.

위 문제의 목적함수 값이 0이 되면, k번째 상정사고가 발생하더라도 발전기와 차단가능부하의 재급전 용량이 안정된 계통운전을 보장할 만큼 충분하다는 것을 의미한다. 그러나, 만약 목적함수 값이 0보다 크게 되면, 주문제에서 결정된 급전계획으로는 k번째 상정사고 시 계통운전이 불가능하게 된다는 것을 의미한다. 이와 같은 경우에는, 주문제의 해를 개선하기 위해, 페널티 변수 값과 해당 결합 제약조건의 Lagrangian 승수값을 주문제로 전송한다. 이는 주문제에서 결정된 급전계획이 k번째 부문제에 어느 정도의 영향을 미치는가에 대한 정보를 제공함으로써, 해당 부문제의 목적함수 값을 최소화할 수 있는 새로운 급전계획을 재수립할 수 있도록 한다.

#### 4.2 주문제의 정식화

주문제는 상정사고 제약조건을 고려하지 않는 정상상태 최적 급전계획 수립을 목적으로 한다. 주문제의 정식화는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{minimize } f(x_0) \\ & \text{subject to } g(x_0) = 0 \\ & h(x_0) \leq 0 \\ & s_k + \lambda_k(x_0 - x_0^m) \leq 0 \text{ for } k = 1, \dots, N_c \end{aligned} \quad (3)$$

단,  $\lambda_k$ 는 k번째 부문제에서 전송한 결합 제약조건의 Lagrangian 승수 벡터이다.

(3)식에서 마지막 제약조건은 부문제에서 전송한 정보를 고려하여 최적의 정상상태 급전계획을 수립할 수 있도록 하는 Benders cut을 나타낸다.

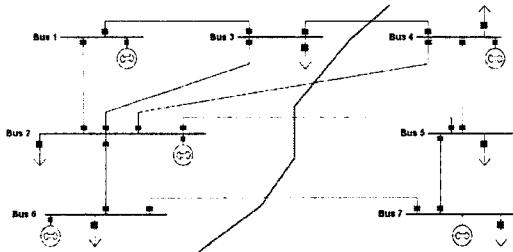
#### 4.3 계산 절차

송전계통 안전도 제약조건을 고려한 최적 급전계획 수립 문제는 주-부문제 간 반복연산 과정을 통해 계산되기 때문에, 초기 시작점을 필요로 한다. 이는 주문제의 마지막 제약조건을 제외하여 계산함으로써 얻을 수 있다. 주어진 주문제의 급전계획에 대해, 부문제의 실행가능여부를 점검한다. 만약 어떠한 부문제에서 송전계통 안전도 제약조건을 위반하는 상황이 발생되면, 해당 결합 제약조건에 대한 Benders cut을 생성하여 이를 주문제에 추가한다. 주문제는 추가된 Benders cut을 고려하여 최적의 급전계획을 재수립하며 그 결과를 부문제로 다시 전송한다. 이러한 과정은 모든 부문제의 목적함수 값이 0이 될 때까지 반복된다.

고려하고자 하는 상정사고에 대한 부문제는 서로 독립적이기 때문에, 부문제의 계산은 분산처리 기법을 이용하여 계산속도를 향상시킬 수 있다. 참고문헌 [10]에서는 이에 대한 내용을 보다 자세히 기술하고 있다.

#### 5. 사례 연구

본 논문에서 제안한 알고리즘의 효율성을 증명하기 위해, 7모선 예제계통에 대한 분석결과를 제시하고자 한다. 위해서 기술한 송전계통 안전도 제약 최적 급전계획 알고리즘을 5개의 발전기와 10개의 선로를 갖는 7모선 예제계통에 대해 적용하였다. <그림 1>에서 보여주고 있는 바와 같이, 계통은 선로 2-4, 2-5, 3-4 및 6-7에 의해 두 개의 지역으로 분리된다.



<그림 1> 7모선 예제계통

<표 1>과 <표 2>는 기본적인 OPF와 송전계통 안전도 제약조건을 고려한 OPF 계산 결과 및 각각의 상정사고 발생 시 변화된 발전기와 차단가능부하의 재급전 수준을 보여주고 있다. <표 3>은 주-부문제 간 반복연산을 통해 해가 개선되는 과정을 보여주고 있다. 이를 통해, 3회의 반복연산 후 해가 수렴되고 있음을 확인할 수 있다.

<표 1> 기본적인 OPF 및 송전계통 안전도 제약 OPF에 의한 발전기 출력 수준 비교

| 모선번호 | OPF<br>(MW) | 송전계통 안전도 제약 OPF |                     |                     |                     |                     |
|------|-------------|-----------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|      |             | 정상상태<br>(MW)    | 상정사고<br>2-4<br>(MW) | 상정사고<br>2-5<br>(MW) | 상정사고<br>3-4<br>(MW) | 상정사고<br>6-7<br>(MW) |
| 1    | 143.05      | 144.72          | 132.72              | 155.05              | 154.32              | 132.93              |
| 2    | 227.50      | 220.56          | 207.19              | 211.23              | 212.50              | 212.50              |
| 4    | 200.00      | 200.00          | 194.00              | 200.00              | 194.00              | 194.25              |
| 6    | 311.67      | 318.46          | 303.46              | 303.46              | 303.46              | 303.46              |
| 7    | 377.78      | 376.25          | 358.31              | 358.25              | 359.78              | 394.25              |

<표 2> 기본적인 OPF 및 송전계통 안전도 제약 OPF에 의한 부하수요 수준 비교

| 모선번호 | OPF<br>(MW) | 송전계통 안전도 제약 급전계획 |                     |                     |                     |                     |
|------|-------------|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|      |             | 정상상태<br>(MW)     | 상정사고<br>2-4<br>(MW) | 상정사고<br>2-5<br>(MW) | 상정사고<br>3-4<br>(MW) | 상정사고<br>6-7<br>(MW) |
| 2    | 70.00       | 70.00            | 70.00               | 70.00               | 70.00               | 70.00               |
| 3    | 175.00      | 175.00           | 165.00              | 165.00              | 165.73              | 173.42              |
| 4    | 140.00      | 140.00           | 133.00              | 133.00              | 133.73              | 139.38              |
| 5    | 200.00      | 200.00           | 185.69              | 185.00              | 194.70              | 185.00              |
| 6    | 325.00      | 325.00           | 310.00              | 325.00              | 325.00              | 325.00              |
| 7    | 350.00      | 350.00           | 332.00              | 350.00              | 334.91              | 344.60              |

<표 3> 주-부문제 간 반복연산 결과

| Iteration(회) | $\sum S_k$ |
|--------------|------------|
| 1            | 0.01467    |
| 2            | 0.00057    |
| 3            | 0.00000    |

## 6. 결 론

경쟁적 전력시장의 도입으로 인해, 다양한 전력거래를 보장하기 위한 충분한 송전용량 확보의 중요성은 더욱 강조되고 있다. 따라서, 경제적이고 안정적인 전력계통 운영을 위해서는 급전계획 시 송전계통 안전도 제약조건의 영향을 고려해야 한다. 그러나, 고려하고자 하는 상정사고의 수에 따라 매우 많은 제약조건이 문제에 추가되기 때문에  $n-1$  상정사고 기준 하에서 최적 급전계획 수립을 위해 이를 직접적인 방법으로 계산할 경우에는 상

당한 계산시간을 소요하게 된다. 또한, 제약조건의 증가 및 결합 제약조건의 존재는 해의 수렴성을 상당히 저하시키는 원인이 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 본 논문에서는 Benders 분해기법을 이용한 송전계통 안전도 제약 급전계획 알고리즘을 제안하였다. Benders 분해기법은 복잡한 원문제를 주-부문제의 2단계 구조로 분해하기 때문에, 보다 단순한 형태로 문제를 구현하여 보다 빠르고 정확하게 해를 계산할 수 있도록 한다. 또한, 향후 경쟁적 전력시장에서는 차단가능부하가 시장참여자의 이익극대화를 위한 수단으로 이용할 수 있기 때문에, 급전계획 시 이를 보다 능동적으로 고려할 수 있어야 한다. 이를 위해, 본 논문은 급전계획 문제의 실행가능성을 보장함과 동시에 차단가능부하의 용량제약까지 고려할 수 있도록 정식화하였다.

향후 연구에서는 이러한 정적 안전도 제약조건뿐만 아니라 동적 안정도 제약조건 또한 고려할 수 있는 급전계획 알고리즘을 고안함으로써, 실제 적용가능한 보다 완성된 형태의 급전계획 모형을 구현하고자 한다.

## [참 고 문 헌]

- A.J.Wood, B.F.Wollenberg, *Power Generation, Operation, and Control*, Wiley, New York, 1984.
- D.W.Ross, et. al., "Dynamic economic dispatch of generation," *IEEE Trans. on Power Apparatus and System*, PAS-99, No.6, pp.2060-2068, 1980.
- A.J.Svoboda, et. al., "Short-term resource scheduling with ramp constraints," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.12, No.1, pp.77-83, 1997.
- P.P.J. van den Bosch, "Optimal dynamic dispatch owing to spinning-reserve and power-rate limits," *IEEE Trans. on Power Apparatus and System*, PAS-104, No.12, pp.3395-3401, 1985.
- Y.Fukuyama, et. al., "An application of neural network to dynamic dispatch using multiprocessors," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.9, No.4, pp.1737-1743, 1994.
- G.Irisarri, "Economic dispatch with network and ramping constraints via interior point methods," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.13, No.1, pp.236-242, 1998.
- A.Monticelli, M.V.F.Pereira, S.Granville, "security-constrained optimal power flow with post-contingency corrective rescheduling," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.2, No.2, pp.175-182, 1987.
- B.Stott, O.Alsac, A.Monticelli, "Security analysis and optimization," *Proceedings of the IEEE*, Vol.75, No.12, pp.1623-1644, 1987.
- H.Y.Yamin, L.Al-Tallaq, S.M.Shahidehpour, "New approach for dynamic optimal power flow using Benders decomposition in an deregulated power market," *Electric Power Systems Research* 65, pp.101-107, 2003.
- O.R.Saavedra, "Relaxed approach for the parallel solution of security-constrained dispatch with post-contingency rescheduling," *IEE Proceeding-Generation, Transmission, and Distribution*, Vol.150, No.3, pp.291-296, 2003.
- 정구형, 이찬주, 김진호, 김발호, 박종배, "경쟁적 전력시장에서의 최적 부하소비전략 수립을 위한 부하관리시스템 패키지 개발", 대한전기학회 논문지A, 53권, 03호, pp.187-197, 2004.
- 정구형, 김진호, 김발호, "부하관리사업자의 비상시 부하제어량 배분 알고리즘 개발", 대한전기학회 논문지A, 53권 08호, pp.466-471, 2004.
- L.S.Lasdon, *Optimization Theory for Large Systems*, Macmillan, New York, 1970.

본 연구는 산업자원부 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소(02-전-01) 주관으로 수행된 과제임.