

**전력시장에서 안전도와 가격을 고려한 발전기 기동정지계획문제에 대한 조사연구**

장세환, 김진호  
부산대학교

**The survey on the Approach to the problem of Security-Constrained Price-Based Unit Commitment in the Deregulated Power Market**

Jang Sehwan, Kim Jinho  
Pusan National University

**Abstract** - This paper introduces a variable of methodology and models of solving Security-Constrained Price-Based Unit Commitment(SPUC) Problems in the Deregulated Power Market. The objective of SPUC is coordination between GENCOs and the ISO. GENCOs apply Price-Based Unit Commitment(PBUC) without security constraints and submit capacity bids to the ISO for maximizing their revenues. Using generation data and transmission data obtained from TRANSCOs, the ISO applies Security-Constrained Unit Commitment(SCUC), executes congestion management and contingency analysis for minimizing line flow violations and the risk supplying loads. Considering analysis data, the ISO should adjust GENCOs' bid. In this paper, we presents the result of survey and analyze on the approach of the SPUC problem.

**1. 서 론**

우리나라를 비롯한 세계의 전력산업들은 기존의 수직적이고 독점적인 산업을 탈피하여 전력산업분야의 효율성 향상을 위하여 경쟁적이고, 탈규제화된 산업구조로 나아가고 있다. 기존의 일원화 된 체계에서는 효율성보다 안정성만을 중시하였다. 하지만 전력산업구조가 복잡·다양해짐에 따라 각각의 독립발전사업자들은 전력의 안정성보다는 자신의 이익 극대화에 목적을 두게 되었다. 그로 인해 다양한 문제가 발생할 수도 있는 가능성을 내포하게 되었다. 국가기반산업의 하나의 큰 축인 전력산업은 경쟁에 의한 효율성 향상으로 국익을 향상시킬 수도 있지만, 반드시 안정적인 전력공급이라는 전제조건을 가지고 있어야만 한다. 그러므로 비영리기관인 시장운영자(Independent System Operator)는 발전사업자들을 규제·감독하여 전력산업의 안정적인 운영을 바탕으로 최상의 효율향상이 이루어 질 수 있도록 노력한다.

본 연구에서는 전력시장의 Security-Constrained Price-Based Unit Commitment(SPUC) 문제에 대한 다양한 접근법과 모델을 소개하고 있다. SPUC 문제는 발전사업자들(GENCOs)과 시장운영자(ISO)간의 조정을 목적으로 하고 있다. 일반적으로 SPUC 문제는 이중적 구조의 문제로 바라볼 수 있다. 우선 발전사업자 입장에서, 발전사업자는 안전도를 고려하지 않고 가격기반의 발전기 기동정지계획(PBUC) 적용하여, 발전기의 기동정지계획을 구성하고, 그들의 이익을 최대화하기 위해서 ISO에 가능한 발전량 입찰을 제출한다. 반면에 ISO는 송전사업자(TRANSCOs)로부터 획득한 송전자료와 각 발전사업자들이 제출한 발전 자료를 바탕으로, 부하전원공급의 위험도와 송전제약의 위반을 최소화하는 상정사고 분석과 구역간과 구역내의 혼잡관리를 수행한다. 수행 결과를 이용하여 ISO는 전송전류(transmission flow)와 모션전압(reactive violation)을 최소화하는 발전기 기동정지계획 즉 안전도를 고려한 발전기 기동정지계획(SCUC) 적용한다. 분석된 자료를 고려하여 ISO는 현실적인 여러 제약조건에 의해서 GENCOs의 입찰 재조정을 유도하여 SPUC 문제의 최적의 해를 발전하여 적용시켜야만 한다.

이번 연구에서는 SPUC 문제의 접근법에 대한 기존의 다양한 연구들을 조사하고 분석하였다. SPUC 문제에 일반적으로 많이 적용되는 틀들을 학습하고 기존의 연구들의 장단점을 분석하여 향후 새로운 연구로 나아갈 수 있는 방향을 찾기 위한 노력의 일환으로서 이번 연구에 진행하였다. 이제 본문에서는 안전도와 안전도평가에 대한 기본적인 개념의 이해와 SPUC 문제 해석에 흔히 사용되는 Benders decomposition에 대해 살펴볼 것이다. 그리고 SPUC 문제에 대한 기존의 다양한 논문들을 살펴볼 수 있을 것이다.

**2. 본 론**

**2.1 전력시스템 안전도와 안전도 평가**

개념적으로 안전은 위험으로부터의 자유를 의미한다. 하지만, 전력시스템에서는 절대적인 안전이란 의미는 결코 성립될 수 없다. 전력시스템에서 안전도는 단지 연속적인 시스템 운영의 중단에 대한 위험의 제한적인 부재를 의미한다.

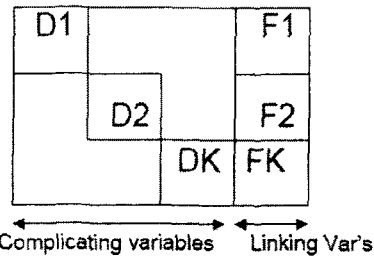
실질적으로, 혼돈을 피하기 위해서 안전도는 안전도를 모니터링하고 측정

하는 방법의 관점에서 정의되어진다. 그래서 안전도는 상정사고에서도 심각한 결과 없이 운영 가능한 시스템의 능력을 의미한다.

전력시스템의 안전도(security) 평가란 전력시스템이 송전선로 사고, 예기치 못한 전력설비 탈락 등의 계통구성 설비의 예기치 못한 사고 또는 개폐기 동작과 같은 외란이 발생할 경우 지속적인 계통운영 능력 정도를 의미하는 것이다. 즉, 외란 발생으로 나타나는 설비의 열적 과부하, 전압 및 전류들이 설비의 내력 이내로 유지될 것인지와 주파수, 전압 및 제동특성과 같은 동특성 등이 제어 가능한 계통 운영 한계치 이내로 유지될 것인가를 판단하는 것이다. [1]

**2.2. Benders Decomposition**

Benders Decomposition은 stochastic programming 문제같이 복잡한 선형 문제 또는 mixed-integer nonlinear programming 문제등을 해결하기 위해 널리 사용되어지는 방법이다. Benders Decomposition이 사용되어지는 문제들은 Block Diagonal 구조라고 불리는 특별한 구조를 지닌 문제이다. 제약조건(constraint set)을 복합(complication) 제약조건과 special 제약조건이라는 하위개념으로 나누고, 유사하게 변수(variable) 또한 연결(Linking) 변수와 복합(complicating) 변수라는 하위 개념으로 나눈다. 이 같은 방법으로 복잡하고 다변수적인 문제들을 개별적으로 분리해서 문제에 접근함으로써 문제를 쉽게 해석해 나가는 방법이다. [13-14]에서는 좀더 구체적인 예를 통한 풀이법을 다루고 있다.



〈그림 1〉 Block diagonal structure with linking variables

**2.3 SPUC Problem에 대한 사례 조사**

전력시장에서의 Security-Constrained Price-Based Unit Commitment(SPUC) 문제에 대한 다양한 접근법과 모델에 대하여 기존의 연구들을 조사하였다. 앞서 언급했듯이 전력시장은 기본적으로 발전사업자와 시장운영자의 두 가지 측면의 이중적인 구조를 가지고 있는 문제라고 할 수 있다. 그래서 인지 기존의 대부분의 연구들은 전력시장을 해석함에 있어서 Benders Decomposition의 방법을 바탕으로 하고 있었다. 아래의 표1은 기존의 각 연구에 대한 좀 더 세부적인 내용을 담고 있다.

〈표 1〉 SPUC Problem에 대한 사례 조사

논문	내 용
[2]	<ul style="list-style-type: none"> <li>스페인 전력시장에서 최적의 일일발전계획에 대한 연구</li> <li>Benders decomposition에 바탕을 둔 알고리즘 설계</li> <li>Three-level Benders decomposition or Nested Benders decomposition 알고리즘</li> <li>전 AC 네트워크와 안전도 제약, dispatch를 고려하였을 때 redispatch 비용을 최소화 각 발전기의 Unit commitment</li> </ul>
[3]	<ul style="list-style-type: none"> <li>공급부하에 대한 부족을 감소시키고 혼잡관리를 위한 ISO와 GENCOs 사이의 조정과정에 대한 연구</li> <li>Benders decomposition을 바탕을 둔 Benders cuts 제안</li> <li>전력시장에서 SPUC 문제에 대한 접근법</li> </ul>
[4]	<ul style="list-style-type: none"> <li>캘리포니아 전력시장에 적용된 Must Offer Waiver process의 결과와 방법에 대한 연구</li> <li>SCUC 접근법을 사용한 시장 운영비의 최소화</li> </ul>

[5]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SCPU 문제에서 가능한 해를 얻기 위한 조건 연구</li> <li>• 조건은 Benders decomposition 이론에 바탕을 둠</li> <li>• Lagrangian relaxation(LR) 이용</li> </ul>
[6]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 보조적 서비스 시장과 에너지 최적화를 고려한 SCUC 연구</li> <li>• Benders decomposition 이론을 이용한 문제 해석</li> <li>• Lagrangian relaxation(LR) 이용</li> <li>• 6-bus and 3 unit system과 IEEE 118-bus and 54 unit system에 제안된 모델 적용</li> </ul>
[7]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 안전도를 고려한 장기 발전기동정지계획 연구</li> <li>• 단기 SCUC 하위문제를 통합해서 구성</li> <li>• Dantzig-Wolfe Decomposition and Subgradient Approach</li> <li>• Lagrangian relaxation</li> <li>• 제안된 방법을 변형된 IEEE 118-bus system을 통해 분석</li> </ul>
[8]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 최소의 시스템 운영비를 위한 AC 제약(네트워크)을 고려한 효율적인 SCUC 연구</li> <li>• Benders decomposition, Lagrangian relaxation method and Dynamic programming</li> <li>• 제안된 방법을 6모선시스템과 IEEE 118-bus system을 통해 분석</li> </ul>
[9]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• GENCOs의 이익을 최대화 하기 위한 안전도를 고려한 최적의 발전스케줄링 연구</li> <li>• Interior Point Method (IPM) &amp; Benders decomposition</li> <li>• 3-bus system을 통한 분석</li> </ul>
[10]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SCUC의 적용에서 Phase Shifter Optimization 연구</li> <li>• Phase Shifter scheduling의 최적화기법은 New York ISO를 대상으로 시행</li> </ul>
[11]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 전력시장에서 웹 기반의 최적의 안전도 비용 분석 연구</li> <li>• 3-tier client/server 구조와 up-to-date web 기술 이용</li> <li>• 제안된 모델 6모선과 129모선 시스템에 적용</li> </ul>

[11] Hong Chen, "Web-based Security Cost Analysis in Electricity Markets", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 20, No. 2, May 2005  
 [12] <http://www.gams.com/~erwin/benders/benders.pdf>  
 [13] <http://www.acsu.buffalo.edu/~nagi/courses/684/bender.pdf>

### 3. 결 론

이번 연구에서는 Security-Constrained Price-Based Unit Commitment(SPUC) 문제에 대한 기존의 다양한 연구들을 조사하고 분석하였다. SPUC 문제에 일반적으로 많이 적용되는 툴들을 학습하고 기존의 연구들의 장단점을 분석하여 향후 새로운 연구로 나아갈 수 있는 방향을 찾기 위한 노력의 일환으로서 이번 연구에 진행하였다. 기존의 대부분의 연구들이 발전사업자와 시장운영자의 이중적 구조를 고려하여 Benders decomposition 방법을 이용하여 전력시장을 해석하고 모델링하였다. 또한 전력시장의 해석과 모델화 과정이 시장운영자의 중심의 SCUC 문제에 대한 연구들이 주로 이루어졌다. 앞으로 경쟁적 시장이 더욱 활성화됨에 따라 가격을 고려한 SPUC 문제에 대한 연구가 활발히 이루어질 것이라고 미루어 짐작해 본다.

### [참 고 문 헌]

[1] Neal Balu, "On-line Power System Security Analysis", Proceedings of the IEEE, Vol. 80, No. 3, February 1992  
 [2] Jorge Martinez-Crespo, "Security-Constrained Optimal Generation Scheduling in Large-Scale Power Systems", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 21, No. 1, February 2006  
 [3] H.Y.Yamin, "Security-constrained Price-based Unit commitment in the deregulated Power Market" IEEE, 2002  
 [4] Qin Zhou, "IEEE/PES transmission and Distribution Conference & Exhibition, 2005  
 [5] Xiaohong Guan, "The Condition for Obtaining Feasible Solutions to Security-Constrained Unit Commitment Problems", IEEE transaction on Power System, Vol. 2, NO. 4, November 2005  
 [6] Zuyi Li, "Security-Constrained Unit Commitment for Simultaneous Clearing of Energy and Ancillary Services Markets", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 20, NO. 2, May 2005  
 [7] Yong Fu, "Long-Term Security-Constrained Unit Commitment : Hybrid Dantzig-Wolfe Decomposition and Subgradient Approach", IEEE Transactions on Power System, Vol.20, No. 4, November 2005  
 [8] Yong Fu, "Security-Constrained Unit Commitment with AC Constraints", IEEE Transactions on Power System, Vol.20, No. 3, August 2005  
 [9] Hatim Yamin, "Security-Constrained Optimal Generation Scheduling for GENCOs", IEEE Transactions on Power System, Vol. 19, No. 3, August 2004  
 [10] S-K. Chang, " Phase Shifter Optimization in Security Constrained Scheduling Applications", IEEE, 2002