

# 적응형 강건 최적화를 활용한 불확실성 고려 SOP 기반 배전계통 조류 제어 방안

최미곤\*, 유경상\*, 김찬수\*, 전덕환\*, 남양현\*, 윤승진\*, 김대진†\*,  
\*한국에너지기술연구원 전력시스템연구실  
chl333mg@kier.re.kr

## An SOP-Based Power Flow Control Method for Distribution Systems Considering Uncertainty Using Adaptive Robust Optimization

Mi-Gon Choi\*, Kyung-Sang Ryu\*, Chan-Soo Kim\*, Jeon Deok-Hwan\*, Yang-Hyun  
Nam\*, Seung-Jin Yoon\*, and Dae-Jin Kim†\*  
\*Electric Power System Research Lab, Korea Institute of Energy Research

재생에너지 및 분산형 전원의 증가로 인해 배전계통의 불확실성이 확대되면서, 선로 과부하 및 전압 프로파일 저하 문제가 주요 운영 이슈로 대두되고 있다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 적응형 강건 최적화를 활용한 Soft Open Point (SOP) 기반 조류 제어 방안을 제안한다. 또한, 적응형 강건 최적화 구조의 계산을 위해 iteration 기반 문제 해결 방법 중 수렴 속도가 빠른 Column-and-Constraint Generation (C&CG) 기법을 적용하여 문제를 해결한다. 제안된 기법은 불확실성을 고려한 데이터 범위 안에서 worst-case 조건에서 선로 과부하를 완화하고 전압 프로파일을 개선하는 조류 제어 값을 도출한다. 제안된 방법의 성능 검증을 위해 2개 변전소와 8개 노드로 구성된 간단한 배전계통을 대상으로 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과, 제안된 SOP 제어 전략은 worst-case에서 계통의 전압 안정성과 선로 운영 여유도를 효과적으로 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

### 1. 서론

최근 재생에너지 및 분산형 전원의 확대에 의해 배전계통의 출력 변동성과 예측 오차가 증가하면서, 전압 프로파일 저하 및 선로 과부하 문제가 주요 운영 이슈로 대두되고 있다. 이러한 불확실성은 기존의 결정론적 조류 제어 방식으로는 효과적으로 대응하기 어려우며, 이를 고려한 최적화 기법의 적용이 필요하다.

불확실성 대응을 위한 대표적인 방법으로 확률적 계획법 및 강건 최적화가 활용되어 왔다. 그러나 확률 기반 방법은 정확한 확률분포를 요구하는 한계가 있으며, 강건 최적화는 분포 정보 없이도 적용 가능하고 worst-case 상황을 고려할 수 있다는 장점이 있다. 다만 기존 강건 최적화는 보수적인 해를 도출하는 경향이 있어 적응형 강건 최적화 방법의 개선점이 주목받았다 [1].

한편, Soft Open Point (SOP)는 배전계통에서 유효 및 무효전력을 유연하게 제어할 수 있는 전력전자 기반 장치로, 전력 흐름 조정, 전압 프로파일 개선 및 부하 분산에 효과적으로 활용될 수 있다 [2].

이에 본 논문에서는 적응형 강건 최적화를 활용한 SOP 기

반 배전계통 조류 제어 방안을 제안한다. 제안된 방법은 불확실성 범위 내 worst-case 조건에서도 선로 과부하 완화 및 전압 프로파일 개선을 목표로 하며, Column-and-Constraint Generation (C&CG) 기반 반복 기법을 통해 효율적으로 문제를 해결한다.

본 논문에서는 SOCP 기반 전력조류 모델과 SOP 수식을 포함한 최적화 문제를 구성하고, master 문제의 primal 구조와 sub problem의 dual 구조에서 iteration을 통해 수렴하는 C&CG 알고리즘을 적용한다. 또한, 간단한 2개 변전소 8개 노드로 구성된 테스트 계통을 통해 제안 기법의 불확실성을 고려한 조류 제어 성능을 검증한다.

### 2. 최적화 문제 및 C&CG 알고리즘

본 논문에서는 조류를 계산하기 위해 SOCP (Second Order Cone Programming) 기반의 disflow 최적화 문제를 활용한다. 이 구조에서 SOP 관련 수식은 다음과 같이 정의된다. Eq. (1)과 같이 SOP 양단의 유효전력 평형이 정의된다.

$$P_{i,t}^{SOP} + P_{j,t}^{SOP} + P_{i,t}^{loss} + P_{j,t}^{loss} = 0 \quad (1)$$

여기서,  $P_{i,t}^{SOP}$  및  $P_{j,t}^{SOP}$ 는 SOP 양단의 유효전력,  $P_{i,t}^{loss}$  및  $P_{j,t}^{loss}$ 는 각 컨버터의 손실을 나타낸다.

Eq. (2)는 SOP 한쪽의 컨버터 손실을 나타낸 것으로 손실 계수와 피상전력에 비례한다고 정의된다.

$$P_{i,t}^{loss} = \mu \sqrt{(P_{i,t}^{SOP})^2 + (Q_{i,t}^{SOP})^2} \quad (2)$$

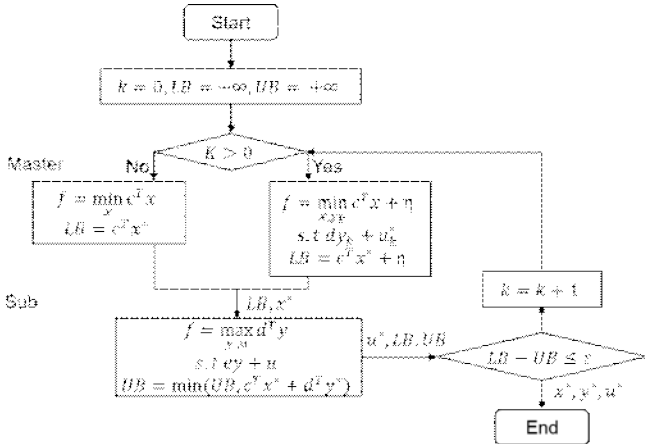
여기서,  $\mu$ 는 손실계수  $Q_{i,t}^{SOP}$ 는 SOP i쪽 컨버터의 무효전력을 나타낸다.

Eq. (3)은 SOP 한쪽 단의 용량 제약을 나타낸 것으로, SOC 구조로 표현되는 것을 확인할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} P_{i,t}^{SOP} \\ Q_{i,t}^{SOP} \end{Bmatrix}_2 \leq C^{SOP} \quad (3)$$

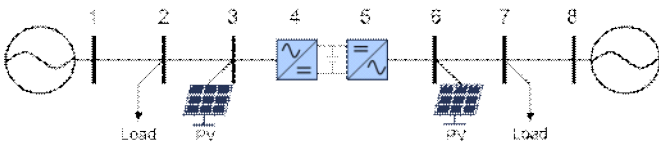
여기서,  $C^{SOP}$ 는 SOP 컨버터의 용량을 나타낸다.

그림 1은 적응형 강건 최적화 구조의 해를 구하기 위한 C&CG 의 알고리즘의 흐름도를 나타낸다. C&CG의 특징은 iteration의 과정 중 sub problem에서 실현된 불확실성 값을 가진 제약조건을 master problem에 추가하여 목적함수의 최적값을 수렴시키는 것이다.



[그림 1] C&CG 알고리즘 흐름도

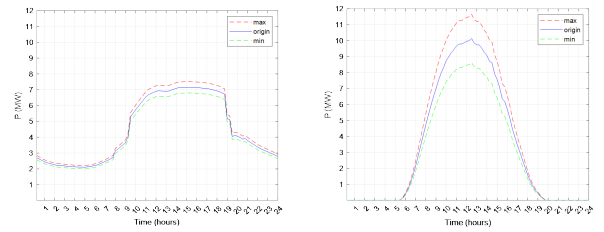
그림 2는 테스트 계통을 나타낸 것으로, SOP 용량은 3MVA, 손실계수는 0.02로 가정하였다.



[그림 2] 테스트 계통

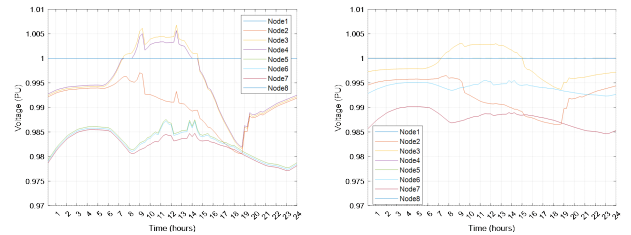
그림 3과 같이 부하 및 PV의 프로파일에 대해 각 시간대마다 불확실성을 고려하여 min-max 값의 범위를 가지는 데이터를 활용하였다. 부하의 경우 매 시간마다  $\pm 5\%$ , PV는  $\pm 15\%$ 의 범위를 가진다고 가정하였다. 또한 부하의 경우 역

류이 0.9라고 가정하였다.



(a) 부하 프로파일 (b) PV 프로파일  
그림 3. 부하 및 PV 프로파일

그림 4와 같이 SOP 제어에 의해 전압 프로파일이 전체적으로 개선된 것을 확인할 수 있다.



(a) SOP 제어 전 (b) SOP 제어 후  
그림 4. SOP 제어 전/후 전압 프로파일

### 3. 결론

본 논문에서는 적응형 강건 최적화를 활용한 SOP 기반 조류 최적 제어 방안에 대해 논의하였다. 이 연구를 통해 불확실성을 포함한 재생에너지 및 부하의 프로파일의 worst-case를 고려한 SOP의 제어 결과를 도출할 수 있었으며, 차후에는 강건성에 따른 운영 비용을 완화하기 위한 방법을 고려하고자 한다.

#### 참고문헌

- [1] H. Deng, "Surveying the Current State of Uncertain Optimization Models and Methodologies," IAENG International Journal of Applied Mathematics, vol. 54, no. 10, pp. 2128-2142, Oct., 2024.
- [2] R. Hu, W. Wang, X. Wu, Z. Chen, and W. Ma, "Interval Optimization Based Coordinated Control for Distribution Networks with Energy Storage Integrated Soft Open Points," International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 136, p. 107725, 2022.

#### 감사의 글

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업 (C6-2410-38) 재원으로 수행한 연구과제의 결과입니다. 이 논문은 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 연구개발특구진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2025-25444452).