

Interior Point Method를 이용한 연계계통에서의 수송능력산정 알고리즘개발에 관한 연구

조재한 · 김용하*** · 이범** · 최상규* · 남광우*** · 문혁기*** · 정현성***
 인천대학교 전기공학과*** · 여주대학교 전기공학과** · 안양과학기술대학교 전기전자통신공학부* · (주)스타리온

A Study on Algorithm for Calculating Power Transfer Capability in Interconnected Power System using Interior Point Method

Jo, J.H.*** · Kim, Y.H.*** · LEE, Buhm** · Choi, S.K.* · Nam, K.W.*** · Moon, H.K.*** · Jung, H.S.***
 Incheon University*** · Yosu National University** · Anyang Technical College* · Starion co.Ltd.

Abstract - This paper presents a efficient algorithm for calculating power transfer capability in interconnected large power system. The approach is based on interior point method. The efficiency of this method is favorable for large systems. IEEE RTS-96 power system is utilized to evaluate the proposed method.

1. 서 론

최근 과학기술의 발달로 인한 사회생활의 고도화와 정보화로 인해 전력수요가 급증하고 있을 뿐만 아니라 무정전, 고품질, 저가격, 고안전성 등이 절대적으로 요구되고 있다. 많은 나라들은 이를 해결하고자 전력의 생산 및 분배의 효율성을 극대화시키려는 연구가 진행되고 있으며, 전력산업에 시장경쟁력을 도입함으로써 전력산업구조의 변화를 일으키고 있다. 즉, 수직독점의 형태에서 생산 및 분배의 기능을 고려한 수평개방적 시장경제체제로 변화하고 있다. 외국의 경우에는 이와 관련하여 매우 활발한 움직움이 일어나고 있다. 1990년 영국의 전력산업구조개편을 필두로 전 세계는 본격적인 전력산업 구조개편의 시대를 맞이하게 되었다. 이로 인하여 결국 송전망의 사용에 대한 규제완화(Deregulation)와 송전망의 자유로운 접근(Open Access)과 같은 전력정책의 변화로 인해 인접지역과의 연계가 용이하게 되었으며, 이로 인해 타 지역과의 수급계약이 활발해 질 수 있게 되었다. 우리 나라에서도 전력산업 구조개편 작업이 진행되고 있으며 구조개편 후의 효율적인 계통운용 및 계획을 위해서는 계통의 수송능력(Power Transfer Capability)을 산정하는 작업이 필수적이다. 수송능력은 공급지역에서 수요지역까지 신뢰적인 전력전송을 허락할 수 있는 송전회로망의 능력으로써 정의되며 외국에서는 이와 같은 수송능력분야에 대한 연구가 활발하게 진행되어오고 있다.[1,2,3,4] 본 연구에서는 구조개편시의 효율적인 계통운용 및 계획을 위하여 필수적으로 고려되어야 하는 연계계통에서의 수송능력을 산정하는 알고리즘을 개발하는데 연구의 목적을 두고 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 대규모계통문제에서 그 효율성이 입증된 Interior Point Method 이용한 계산시간이 빠르고 신뢰적인 대규모 연계계통에서의 수송능력을 산정하는 알고리즘을 제안하였으며 이를 시험계통에 적용하여 본 연구의 타당성을 검증하고 유용한 정보를 도출하였다.

2. Interior Point Method(5)

본 연구에서는 대규모전력계통에서 수송능력의 효율적인 계산을 위하여 제어변수와 제약식의 개수가 큰 문제에서 수렴특성이 좋은 Interior Point Method를 이용하였다. Interior Point Method가 개발된 1984년도 이전까지는 LP문제를 푸는데 있어 Simplex

알고리즘이 가장 보편적인 방법이었다. 그러나 LP 문제를 푸는데 있어 문제의 크기(변수의 개수 + 제약식의 개수)가 커질수록 Interior Point Method는 Simplex 알고리즘보다 더욱 효과적이며, 대규모 문제에서는 50배 정도 빠른 것으로 알려져 있다. Interior Point Method의 가장 두드러진 계산특징은 최적해를 탐색하는 경로에 있으며 이를 Simplex 알고리즘과 비교하면 다음 그림1과 같다.

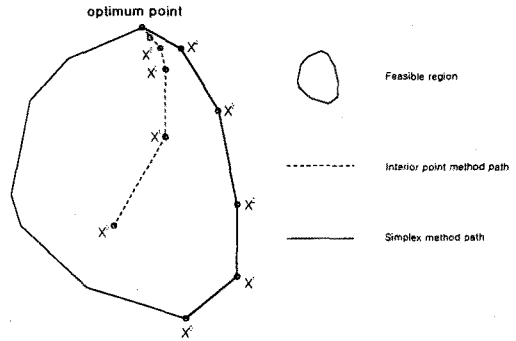


그림1. Interior Point Method와 Simplex Method의 최적해 탐색 경로 비교

그림1에서 Simplex 알고리즘은 실행가능영역 모서리의 극점을 따라 최적해를 탐색하는 반면에 Interior Point Method는 실행가능영역의 내부에서 목적함수를 가장 크게 개선하는 방향으로 탐색함으로써 최적해에 도달한다. 특히 Interior Point Method의 경우는 초기 탐색과정에서 최적해에 빨리 접근한다. 이때 최적해에 도달하기 위한 반복횟수는 Simplex 알고리즘에서는 문제의 크기가 커짐에 따라 지수함수적으로 증가하게 되나 Interior Point Method는 문제의 크기에 관계없이 50회 이내에서 수렴하는 것으로 알려져 있다. 이와 같은 계산특성에 기인하여 Interior Point Method는 대규모 문제에서 그 효율성이 입증되었으며 최근에는 이를 전력계통문제에 적용하기 위한 연구도 활발히 진행되어 최적 조류계산, 선로제약을 가진 경제부하배분, 무효전력배분, 연료계획분야 등에서 연구논문으로 발표된 바 있다.

3. 수송능력산정문제의 정식화

일반적으로 수송능력 산정문제는 주어진 부하 및 계통조건 하에서 연구지역(Study Area)에서 참여지역(Participating Areas)으로 또는 참여지역에서 연구

지역으로 보낼 수 있는 수송능력을 계산하는 문제이며 다음과 같이 정식화된다.

$$\begin{aligned} \text{Max. } & \sum_{(i,j) \in K} P_{ij} & (1) \\ \text{S.t. } & \text{전력평형식} \\ & \text{운전제약조건} \\ & \text{제어변수의 상하한} \end{aligned}$$

단, P_{ij} : 선로 i - j 사이를 흐르는 유효전력
 K : 지역(Area)들을 연결하는 연계선의 집합

본 연구에서는 위의 식(1)로 정식화되는 수송능력 문제의 효율적이고 신뢰적인 계산을 위하여 수송능력 산정문제를 다음과 같이 정식화하였다. 즉, 계통의 상태변수를 x , 제어변수를 u 라 할 때, 주어진 운전 상태 x^0, u^0 가 조류방정식의 해가 아닐 경우 조류방정식의 계산치 전력과 지정치 전력간에 편차가 발생한다. 이때, 모든 모선에 가상발전기를 배치시킨 다음, i 모선에서의 편차를 $P_{Mi} + Q_{Mi}$ 라하고, 이 편차를 i 모선의 가상발전기가 담당하도록 한다.

이때, x^0 와 u^0 는 가상발전기 출력을 포함한 현재 계통의 운전조건을 나타낸다. 이 경우 조류방정식의 해는 가상발전기의 출력 P_{Mi} 와 Q_{Mi} 이 0으로 되도록 제어변수 u 를 제어함으로써 구해지게 된다. 따라서 수송능력 산정을 위한 최적조류계산 문제는 다음식(2)와 같이 정식화 할 수 있다[6].

$$\begin{aligned} \text{Max. } & \mu \sum_i (|\Delta P_{Mi}| + |\Delta Q_{Mi}|) + \sum_{(i,j) \in K} P_{ij} & (2) \\ \text{S.t. } & \text{전력평형식} \\ & \text{운전제약조건} \\ & \text{제어변수의 상하한} \end{aligned}$$

단, μ : 가중치
 $\Delta P_{Mi}, \Delta Q_{Mi}$: 가상발전기 출력 변화량

위의 식(2)으로 구성되는 최적조류계산 문제는 대규모 문제이다. 따라서 본 연구에서는 신속한 수송능력 계산을 위하여 Costae방법 및 변수축약법[6]을 이용하여 식(2)을 다음식(3)같이 선형화된 식으로 정식화한 다음 Primal-Dual Interior Point Method를 이용하여 수송능력문제를 계산하였다.

$$\begin{aligned} \text{Max. } & c^T y & (3) \\ \text{S.t. } & A_e^T y = b_e \\ & b_i^{\min} \leq A_i^T y \leq b_i^{\max} \\ & y^{\min} \leq y \leq y^{\max} \end{aligned}$$

식(3)에서 y 는 제어변수 변화량에 관한 열벡터이고, c 는 목적함수에서의 각 제어변수 변화량에 대한 계수행렬인 행벡터이다. 그리고, A_e 는 선형화된 계통 전력평형식의 계수행렬인 행벡터이고, A_i 는 선형화된 유효운전제약조건들의 계수행렬이다. 그리고 b_i 는 유효운전제약조건들의 허용한계치로 구성된

열벡터이다. 식(3)의 선형화된 최적화모델은 다음절에서 설명하는 대규모계통에서 그 효율성이 입증된 Primal-Dual Interior Point Method를 이용하여 계산하였다.

4. Primal-Dual Interior Point Method 에 의한 수송능력계산

본 연구에서는 다음과 같이 Primal-Dual Interior Point Method를 사용하여 식(3)의 선형계획문제를 해결하였다. 먼저, 식(3)를 표준형으로 바꾸면 다음식과 같다. 식(3)의 y 는 식(4)에서 x 로 표현하였다.

$$\begin{aligned} \text{Min. } & c^T x \\ \text{S.t. } & A_e x = b_e \\ & A_i x + s = b_i \\ & -x - s = -h \\ & x \geq 0, s \geq 0, w \geq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

위의 식(4)의 dual은 다음식(5)와 같다.

$$\begin{aligned} \text{Min. } & b_e^T \lambda + b_i^T \mu - h^T \nu \\ \text{S.t. } & A_e^T \lambda + A_i^T \mu - \nu + z = c \\ & z \geq 0, \nu \geq 0, \mu \leq 0, \lambda \text{ unrestricted} \end{aligned} \quad (5)$$

위의 식(5)에서 ν, μ, λ 는 식(4)의 제약조건들에 대한 Lagrange multiplier를 의미한다. 지금, 식(4)에서 부등호제약들을 logarithmic barrier function로 취급하여, Lagrange 확대목적함수를 구성하면 다음식(6)과 같다.

$$\text{Min } c^T x - \sigma (\sum \ln x_i + \sum \ln s_i + \sum \ln w_i) + \lambda^T (b_e - A_e x) + \mu^T [b_i - A_i x - s] + \nu^T (x + w - h) \quad (6)$$

식(6)에서 1차 최적조건을 구하면 다음 식(7)로 표현된다.

$$\begin{aligned} A_e x &= b_e \\ A_i x + s &= b_i \\ x + w &= h \\ A_e^T \lambda + A_i^T \mu - \nu + z &= c \\ XZ e &= \sigma e \\ SM e &= -\sigma e \\ WN e &= \sigma e \end{aligned} \quad (7)$$

단, $X = \text{diag}(x_1, \dots, x_n)$, $S = \text{diag}(s_1, \dots, s_n)$, $W = \text{diag}(w_1, \dots, w_n)$,
 $M = \text{diag}(\mu_1, \dots, \mu_n)$, $N = \text{diag}(\nu_1, \dots, \nu_n)$, $Z = \text{diag}(z_1, \dots, z_n)$,
 $e = (x_1, \dots, x_n)^T$,
 n : 제어변수 x 의 차원
 I : 부등호제약조건들의 개수

지금, 위의 식(7)로 표현되는 1차 최적조건은 뉴턴법을 사용하여 반복적으로 계산된다.

지금까지, 본 연구에서 제시한 수송능력 산정알고리즘의 흐름도는 그림2와 같다.

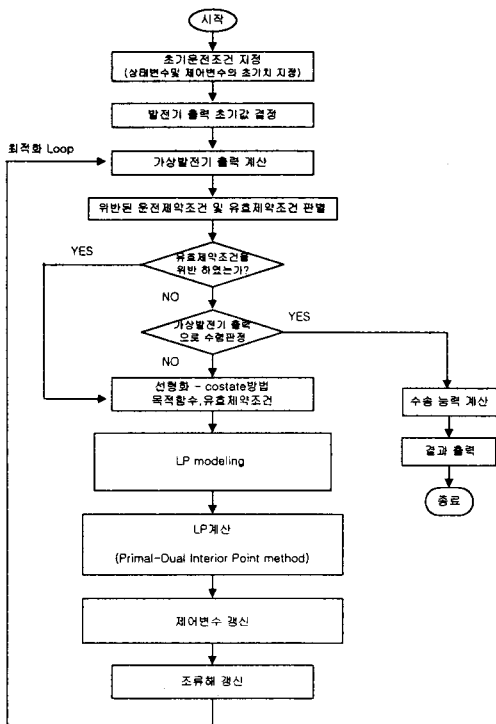


그림2 수송능력 산정 알고리즘의 흐름도

5. 사례 연구

본 논문에서 제안한 Primal-Dual Interior Point Method에 의한 수송능력산정 알고리즘을 IEEE RTS-96 모델계통에 적용하여 수송능력산정 결과를 분석하였다. RTS-96 모델계통은 그림3과같이 3개의 지역으로 구분한 다음 지역1을 연구지역으로 지역2, 3을 참여지역하여 제안한 알고리즘의 분석을 하였다.

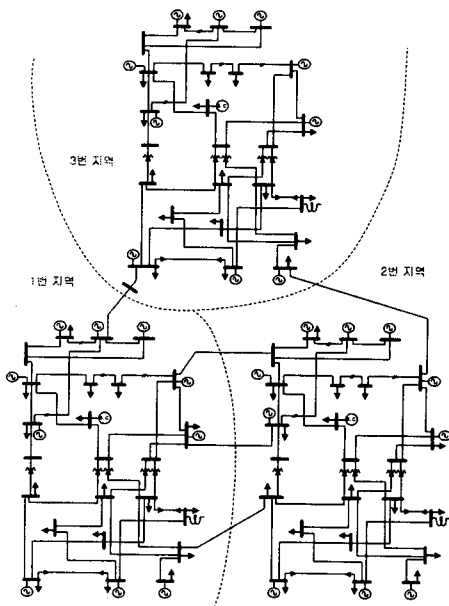


그림3 IEEE RTS-96 모델계통

먼저, 표1은 매반복계산시의 수송능력 계산결과를 보여준다. 이 표로부터 본 연구에서 제안한 Primal-Dual Interior Point Method에 의한 수송능력산정 알고리즘은 6회만에 수렴한다는 것을 알 수 있다.

표1. IEEE RTS-96 모델계통에서의 수송능력 계산결과

반복 횟수	유효운전제한 조건수	최대유효전력편차 [pu]	최대무효전력편차 [pu]	수송능력 [MW]
1	13	5.86566	6.04536	-17
2	14	4.40998	4.54377	-632
3	20	2.22142	2.28684	600
4	24	0.56762	0.58311	1143
5	26	0.00431	0.00443	1208
6	27	0.00068	0.00065	1332

다음에는 본 연구에서는 제시한 알고리즘의 신뢰성을 증명하기 위하여 연구지역의 부하량을 변화시켜가면서 최적화기법으로 Simplex method의 사용시와 수송능력계산결과를 분석하여 보았다. 표2로부터 알 수 있듯이 연구지역의 부하가 변화해도 수송능력계산시의 수렴특성은 두가지 방법모두 별로 영향을 받지 않고 신뢰적인 결과를 보여준다는 것을 알 수 있지만 연구지역부하량의 5%감소시에는 제시한 방법의 수렴성이 우수하다는 것을 알 수 있다. 그리고 이와같은 경향은 대규모계통으로 갈수록 본 연구에서 제시한 방법이 더욱 우수한 특성을 보여 줄 것으로 사료된다.

표2. 연구지역 부하량 변화

연구지역 부하량	Simplex method 반복계산횟수	Interior Point Method 반복계산횟수	수송능력 [MW]
base case	6	6	1332
5% 증가	6	6	1300
5% 감소	10	8	1338

6. 결론

본 연구에서는 구조개편시의 효율적인 계통운용 및 계획을 위하여 필수적으로 고려되어야 하는 연계계통에서의 수송능력을 산정하는 알고리즘을 개발하는데 연구의 목적을 두고 있으며 이를 위하여 본 연구에서는 대규모계통문제에서 그 효율성이 입증된 Primal-Dual Interior Point Method 이용한 계산시간이 빠르고 신뢰적인 대규모 연계계통에서의 수송능력을 산정하는 알고리즘을 제안하여 최적해의 수렴특성을 개선시키는 방법을 제시하였다.

향후 본 연구를 기반으로 하여 연구가 계속 진행될 경우 발전과 송전설비의 효율적 이용에 따른 전력사업비용의 저감 등으로 인한 경제성 강화 및 이에 따른 경제적인 발전 및 송전설비의 확충계획 수립, 설비의 경쟁적 사용으로 인한 효율적인 요율체계의 확립에 도움이 될 것으로 사료된다.

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구
(1999-2-30200-001-3) 지원으로 수행되었음.

(참 고 문 헌)

- [1] J.C.O.Mello, A.C.G.Melo, S.Granville, "Simultaneous Transfer Capability by Combining Interior Point Methods and Monte Carlo Simulation" IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 2, May 1997
- [2] G.C.Ejebe, J.Tong, J.G.Waight, J.G.Frame, X.Wang, W.F.Tinney, "Available Transfer Capability Calculations", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.13, No.4, November 1998
- [3] Mark H.Gravener, Chika Nwankpa, "Available transfer capability and first order sensitivity", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.14, No.2, May 1999
- [4] "Available Transfer Capability Definitions and Determination", North American Electric Reliability Council(NERC), Jun 1996
- [5] EIRAJ REZANIA, S. M. SHAIDEHPOR "Calculation of Transfer Capability of Power System Using an Efficient Predictor-Corrector Primal-Dual Interior-point Algorithm", Electric Machines and Power System, 1999
- [6] "Monte-Carlo simulation을 이용한 연계계통의 최대수송능력 산정". pp.360-362. 2000년. 7월. 대한전기학회 하계 학술대회 논문집.