

The Development of Algorithm for Evaluating Power Wheeling Effects

金龍河* · 李 范** · 崔祥圭*** · 朴商敏[§] · 趙載漢^{§§}

(Yong-Ha Kim · Buhm Lee · Sang-Kyu Choi · Sang-Min Park · Jae-Han Cho)

Abstract - This paper presents an algorithm for evaluating power wheeling effects. For a specific operating condition, the effects are quantified by the sensitivity of specific quantities of interest with respect to power wheeling level. Quantities of interest are total operating cost, transmission losses, and system security which is quantified with several indices. The model and solution method are applied on a example power system and the results are presented.

Key Words : 전력탁송, 가상발전기, 모델축약, Costate 방법, 감도계산, 최적조류계산

1. 서 론

최근, 전력산업에 있어, 송전계통을 소유하고 있는 회사나 선로의 사용권한을 가지고 있는 회사가 다른 전기공급자나 사용자에게 그들간의 전력의 전송을 위하여 송전계통을 사용하도록 하는 송전선로의 자유로운 접근(Open Access)이라는 주제가 중요한 관건이 되고 있다. 따라서, 이와 같이 제 3 자가 소유하고 있는 송전망을 통하여 전력판매자로부터 전력구매자에게 전력을 공급하는 전력탁송(Power Wheeling)[2,3,4]이 매우 중요한 문제로 대두되고 있다. 즉, 많은 나라에서 전력회사들은 자신이 보유하고 있는 발전기들의 경제성 및 유용성을 높이기 위하여 송전선로를 각 전력회사가 공용으로 사용할 수 있도록 전력공급 지역에 대한 규제를 완화하고 있다. 이는 저가격, 고품질, 고안전성을 고려한 전력의 생산 및 배분의 효율성 극대화를 위한 필연적인 결과로 받아들여지고 있다. 이와 같은 상황에서 우리나라의 전력산업도 전력산업구조개편에 의해 다양한 형태의 시장경쟁체제로 변화할 것이다. 이때에는 전력계통의 계획 및 운용은 현재와는 판이하게 상이해 질 것이며, 특히 송전계통의 운용 및 계획은 질적으로 달라질 것이다. 그러므로 현재 우리 나라의 전력산업에 대한 변화추이, 전력산업의 규제완화로 인한 민자화, 멀지 않은 장래의 인접국가의 다른

계통과의 연계가능성 등을 고려할 때 전력탁송에 대한 연구가 꼭 필요하다 하겠다.

본 연구에서는 이의 기반연구로서 가상발전기의 도입 및 모델축약 등을 통하여 수렴성이 보장되고, 계산시간이 빠른 새로운 최적조류계산기법[1]을 제안하였다. 또한, 전력탁송이 발전비용, 송전손실, 계통안전도에 미치는 영향을 분석할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 여기서, 전력탁송 영향평가를 위한 발전비용, 송전손실, 계통안전도에 대한 감도를 효율적으로 계산하기 위하여 costate 방법[5]을 도입하였다. 그리고 본 연구에서 제안한 방법을 시험계통에 적용하여 본 연구의 타당성을 검증하고 유용한 정보를 도출하였다.

2. 최적조류계산

본 연구에서는 전력탁송문제를 계산하기 위하여 수렴성이 보장되며 대규모 계통에 대해서도 계산시간이 빠른 새로운 최적조류계산기법을 제안하였다.[1] 본 연구에서 제안하는 최적조류계산기법의 주요내용은 다음과 같다.

2.1 정식화

계통의 상태변수를 x , 제어변수를 u 라 할 때, 주어진 운전조건 x^0, u^0 가 조류방정식의 해가 아니라면 조류방정식의 계산치전력과 지정치전력간에 편차가 발생한다. 지금, 그림1에서와 같이 i 모선에 가상발전기를 배치시킨 다음, i 모선에서의 편차를 $P_{Mi} + Q_{Mi}$ 라하고, 이 편차를 i 모선의 가상발전기가 담당하도록 한다면, 이때, x^0 와 u^0 는 가상발전기 출력을 포함한 현재 계통의 운전조건을 나타낸다

*正 會 員 : 仁川大 電氣電子工學部 副教授 · 工博

**正 會 員 : 麗水大 電氣및半導體工學部 助教授 · 工博

***正 會 員 : 安養科學大學 電氣制御科 助教授 · 工博

§ 正 會 員 : 仁川大 産業工學科 教授 · 工博

§§ 準 會 員 : 仁川大 電氣工學科 碩士課程

接受日字 : 1999年 8月 6日

最終完了 : 1999年 9月 20日

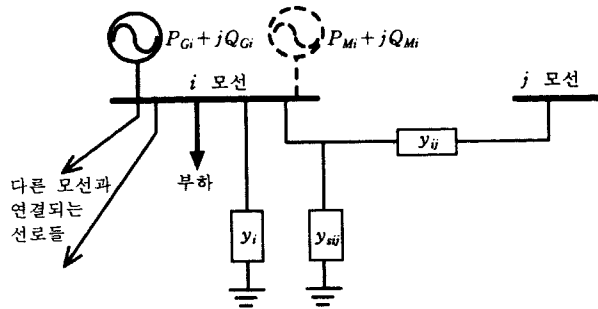


그림 1 전력계통의 일반적인 i 모선
Fig. 1 i bus of power system

한편, 계통의 실제적인 운전조건은 가상발전기의 출력을 점차적으로 0으로 줄이면서 가상발전기 출력이 0으로 될 때의 x 와 u 가 된다. 따라서, 최적조류계산문제는 다음 식(1)과 같이 가상발전기 출력을 0이 되도록 하며 계통의 발전비용을 최소화하는 최적화문제로 정식화할 수 있다.

$$\text{Min. } \sum_j^{N_G} f_j(P_{Gj}) - \mu \sum_i (|\Delta P_{Mi}| + |\Delta Q_{Mi}|) \quad (1)$$

S.t. 전력평형식
운전제약조건
제어변수의 상하한

단, $f_j(P_{Gj})$: j 발전기의 연료비 함수
 μ : 가중치
 $\Delta P_{Mi}, \Delta Q_{Mi}$: i 모선에서의 증분편차변수

2.2 모델 축약

신속한 계산을 위해서는 변수의 개수를 축소하여야 한다. 본 연구에서는 우선, 가상발전기의 출력변화를 다음 식(2)와 같이 식(1)의 2n개의 증분편차변수를 하나의 제어변수 v 로 대체하여 축약하도록 하였다.

$$\begin{aligned} \Delta P_{Mi} &= -P_{Mi} v, \quad i=1,2,\dots,n \\ \Delta Q_{Mi} &= -Q_{Mi} v, \quad i=1,2,\dots,n \end{aligned} \quad (2)$$

단, v : 편차변수의 규준화된 변화율 ($0 \leq v \leq 1$)

다음으로, 전체발전기를 경제급전에 참여하는 발전기, 고정출력으로 운전되는 발전기, 출력제어는 가능하나 경제급전에 참여하지는 않는 발전기의 세 개의 그룹으로 분류하고, 이중 경제급전 발전기 변수들은 경제급전과정을 포함하여 단일변수로 대체한다. 즉, 각 경제급전 발전기 출력변수 P_{Gk} 는 다음 식(3)과 같이 단일 변수 w 를 이용하여 표현할 수 있으므로 모든 경제급전 발전기출력 변수 P_{Gk} 를 단 하나의 변수 w 로 축약하도록 하였다.

$$P_{Gk} = P_{Gk}^0 + pf_k \cdot w \quad (3)$$

단, pf_k : 경제급전참여계수(Economic Participation Factor)

w : 계통의 총 발전변화량

이상의 변환과 운전점주변의 선형화를 통하여 앞의 식(1)의 대규모 비선형계획문제를 다음 식과 같이 문제의 크기가 대폭 축소된 선형계획문제로 정식화하였다.

$$\text{Min. } C \cdot y \quad (4)$$

$$\text{S.t. } A_e \cdot y = b_e$$

$$b_i^{\min} \leq A_i \cdot y \leq b_i^{\max}$$

$$y^{\min} \leq y \leq y^{\max}$$

단, C : 목적함수의 계수

A_e, A_i : 등호제약, 부등호제약조건 계수

y : 제어변수

b_e, b_i : 제약 한계치

지금까지의 최적조류계산 기법은 다음의 계통의 전력탁송 영향평가를 위한 감도계산시에 최적인전점계산에 이용된다.

3. 전력탁송 영향평가

전력계통에 있어서 전력탁송의 영향은 계통의 최적인전점 근처에서 전력탁송에 따른 관심량인 발전비용, 송전손실, 계통안전도(전압안전도, 전력조류안전도)에 대한 증분변화 즉, 감도계산에 의해 측정할 수 있다. 본 연구에서는 전력탁송 영향평가를 위해 다음과 같은 방법으로 감도계산을 하였다.

3.1 전력탁송 지수

전력탁송에 대한 영향평가를 위해 본 연구에서는 다음과 같은 식으로 표현되는 발전비용, 송전손실, 전압안전도지수 그리고 조류안전도지수를 사용하였다.

표 1 전력탁송 영향평가 지수

Table 1 Indices for evaluating power wheeling effects

경제성	발전비용	$F_1 = \sum_{j=1}^{N_G} (a_j + \beta_j P_{Gj} + \gamma_j P_{Gj}^2) [\$]$ (5)
	송전손실	$F_2 = \sum_{l=1}^{N_l} R_l I_l^2 [MW]$ (6)
안전성	전압안전도	$F_3 = \sum_{i=1}^n w_i \left(\frac{V_i - V_{i,av}}{V_{i,st}} \right)^2$ (7)
	조류안전도	$F_4 = \sum_{l=1}^{N_l} w_l \left(\frac{S_l}{S_{l,max}} \right)^2$ (8)

여기서,

N_G, N_l : 발전기 및 선로의 수

V_i : i 모선의 전압크기

$$V_{i,av} = \frac{1}{2}(V_i^{\max} + V_i^{\min}), V_{i,st} = \frac{1}{2}(V_i^{\max} - V_i^{\min})$$

w_i : i 모선의 가중치, w_l : l 선로의 가중치

S_l : l 선로의 피상조류, S_l^{\max} : l 선로의 MVA 용량

3.2 감도계산

앞에서 설명한 관심량에 대한 전력탁송영향평가를 위한 감도계산방법은 다음과 같다. 지금, 그림 2는 i 모선에 전력판매자가 연결되고, j 모선에 전력구매자가 연결되어 있는 것을 나타낸다.

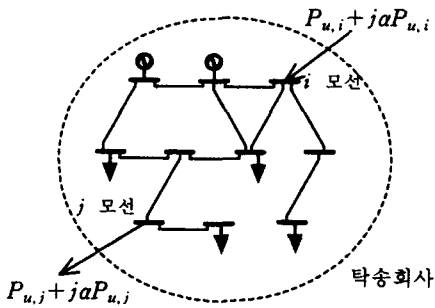


그림 2 탁송계통
Fig. 2 Wheeling system

이 그림에서 P_u 는 탁송전력인 전력탁송 제어변수를 의미하며, α 는 탁송전력의 유효전력에 대한 무효전력의 비를 나타낸다. 계통에 대한 전력탁송의 영향은 관심량인 식(5)~(8)을 P_u 로 미분함으로써 정량화 되어질 수 있다. 본 연구에서는 탁송전력 P_u 에 대한 식(5)~(8)의 미분치의 효율적인 계산을 위하여 정확하고 계산시간이 빠른 기법으로 알려진 Costate 방법을[5] 이용하였다. Costate 방법에 의하면 i 모선에서의 관심량 F_* 의 전력탁송제어변수 P_u 에 대한 미분치 즉, 감도계산식은 다음 식(9)로 표현된다.

$$\frac{dF_*}{dP_{u,i}} = \frac{\partial F_*}{\partial P_{u,i}} - \hat{\lambda}^T \frac{\partial g(x, P_u)}{\partial P_{u,i}} \quad (9)$$

$$\text{단, } \hat{\lambda}^T = \frac{\partial F_*}{\partial x} \left[\frac{\partial g(x, P_u)}{\partial x} \right]^{-1}$$

$\frac{\partial g(x, P_u)}{\partial x}$: 자코비안 행

F_* : 발전비용, 송전손실,
전압안전도, 조류안전도지수

본 연구에서의 전력탁송에 대한 영향평가는 앞의 식(9)에 의해 계산된 각각의 관심량에 대한 감도를 이용하여 다음 식(10)과 같이 두 모선사이의 전력탁송에 관한 감도계산을 통하여 수행하였다.

$$S_* = \frac{dF_*}{dP_{u,i}} - \frac{dF_*}{dP_{u,j}} \quad (10)$$

3.3 계산 알고리즘

본 연구에서 제안한 전력탁송영향평가 알고리즘은 ① 계통자료입력, ② 계통의 최적운전상태를 계산하기 위한 최적조류계산 수행, ③ 식(9)를 이용한 관심량에 대한 감도계산, ④ 식(10)을 이용한 두 모선사이의 전력탁송에 관한 관심량에 대한 감도계산을 통하여 수행토록 하였다.

4. 사례연구

본 연구에서 제안한 전력탁송 영향평가 알고리즘을 그림 3의 10모선 시험계통에 적용시켰다. 이때 전력탁송영향평가를 위해 1, 2, 3번 모선을 전력판매자가, 8, 9, 10 모선을 전력구매자가 연결될 수 있는 모선으로 가정한 다음 전력탁송영향평가를 실시하였다.

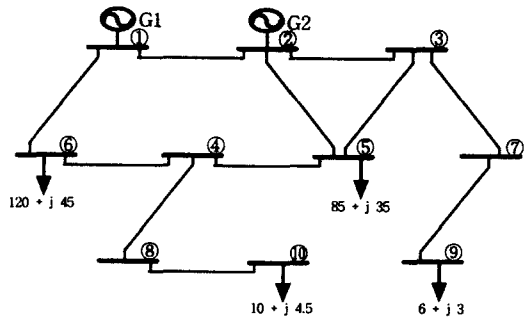


그림 3 10모선 시험계통
Fig. 3 10-Bus test system

즉, 1, 2, 3번 모선과 8, 9, 10번 모선을 조합한 9개의 전력탁송을 위한 모선쌍에 대하여 전력탁송영향평가를 실시하였다.

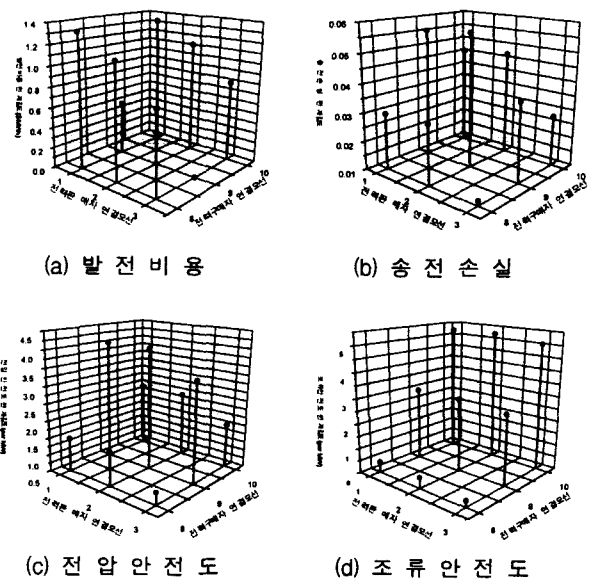


그림 4 각종 지수에 대한 감도
Fig. 4 Sensitivities for each indices

먼저, 그림 4는 전력탁송을 위하여 앞에서 가정한 각각의 모선쌍에 대한 발전비용, 송전손실, 전압안전도지수, 그리고 조류안전도지수의 감도를 나타낸 것이다. 이 그림에서 발전비용과 손실면에서는 감도값이 클수록 전력탁송으로 인한 탁송회사의 발전비용 및 송전손실의 증가량이 크다는 것을 의미한다.

또한, 전압안전도와 조류안전도면에서는 감도값이 클수록 전력탁송으로 인한 탁송회사의 전압안전도 및 조류안전도 면에서 바람직하지 못한 영향을 준다는 것을 의미한다. 마지막으로, 표 2는 그림4와 같이 계산된 각각의 관심량에 대한 감도 중 최소감도와 최대감도를 나타내는 모선쌍과 그 값을 나타낸 것이다.

표 2 최소감도 및 최대감도 모선쌍 (단, $\alpha=0.2$)

Table 2 Buses for min & max sensitivity

관심량	최 소 감 도		최 대 감 도	
	모선쌍	감도값	모선쌍	감도값
발전비용(\$/MWh)	3-9	0.000	1-8	1.323
송전손실	3-8	0.012	2-9	0.057
전압안전도(per MW)	3-8	0.851	2-9	4.012
조류안전도(per MW)	3-8	0.243	2-10	5.241

이 표에서 알 수 있듯이 발전비용면에서는 3-9모선쌍이, 송전손실, 전압안전도, 조류안전도면에서는 3-8모선쌍이 전력탁송을 위해서 가장 유리한 모선쌍으로 나타났음을 알 수 있다. 따라서, 이들 결과는 전력탁송을 위한 모선쌍 결정 등 계통의 운전계획을 위한 포괄적인 정보를 제공해 주는 좋은 길잡이 역할을 할 수 있을 것으로 생각한다.

5. 결 론

본 연구에서는 현재 국내에서 추진되고 있는 전력산업구조개편시 필요한 전력탁송에 대한 기반연구로서, 전력탁송문제를 계산하기 위하여 계산시간이 빠르고 수렴성이 보장되는 새로운 최적조류계산기법 및 전력탁송이 발전비용, 송전손실, 계통안전도에 미치는 영향을 분석하기 위한 효율적인 전력탁송영향평가 알고리즘을 제안하였다. 이후 이에 기

초하여 전력계통의 운전에서 전력탁송효과의 평가를 위해 상정사고까지 고려하고자 한다. 따라서 본 연구가 계속 진행될 경우 발전 및 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 확립 등을 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

“이 논문은 1998년도 한국학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 지원되었음”

참 고 문 헌

- [1] 조재한, 김용하, 이범, 최상규, "Power Wheeling 산정 알고리즘의 개발", 전력계통연구회 춘계학술대회 논문집 pp. 40-42, 1999.5
- [2] H. H. Happ, "Cost of wheeling methodologies", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 1, pp. 147-156, February 1994
- [3] Hyde M. Merrill, Bruce W. Erickson, "Wheeling Rates Based on Marginal-Cost Theory", IEEE transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 4, pp. 1445-1450, October, 1989
- [4] A.A. EI-Keib, X. Ma, "Calculating Short-Run Marginal Costs of Active and Reactive Power Production", IEEE transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 2, pp. 559-564, May, 1997
- [5] A.P. Meliopoulos and A.S. Debs, "Impact of Improved On-Line Security Dispatching on Long-Term Transmission Expansion Planning", Proceeding of PICA, Toronto, Ontario, Canada, May 24-27, 1997