

연계 계통에서의 환경적 배출량과 손실을 고려한 최적 경제급전

최승조*^o 이상봉* 김규호** 유석구*
 한양대학교* 안산공과대학**

Multi-Area Economic Dispatch
 Considering Environmental Emission and Transmission Losses

Seung-Jo Choi*^o Sang-Bong Rhee* Kyu-Ho Kim** Seok-Ku You*
 Hanyang University* Ansan College of Technology**

Abstract - Traditionally electric power system are operated in such a way that the total fuel cost is minimized regardless of accounting for tie-lines transmission constraint and emissions produced. But tie-lines transmission and emissions constraint are very important issues in the operation and planning of electric power system.

This paper presents the Two-Phase Neural Network(TPNN) to solve the Economic Load Dispatch (ELD) problem with tie-lines transmission and emissions constraint considering transmission losses. The transmission losses are obtained from the B-coefficient which approximate the system losses as a quadratic function of the real power generation. By applying the proposed algorithm to the test system, the usefulness of this algorithm is verified.

어 있다[4]. 그리고, TPNN은 제약식이 정확히 만족되도록 뉴턴의 다이내믹스를 개선하는 특성으로 수치적 해법과 같은 발전출력을 얻을 수 있다. 초기값이 수렴여부에 중요하게 영향을 주는 기존의 신경망과는 달리 실현 불가능영역(infeasible region)에서의 초기값에서도 수렴성에 영향을 미치지 않는다.

2. ECED문제의 TPNN 응용

2.1 ECED문제의 정식화

ECED문제에서는 기존의 경제적인 면만을 고려하는 ELD문제와 화력 발전소로부터의 오염물질 배출에 관한 환경적인 영향을 동시에 해석해야 하므로 다음과 같이 분류하여 정식화 할 수 있다.

2.1.1 경제적인 문제의 정식화

· 목적함수

$$\text{Min } C_{total} = \sum_i f_{c_i} * H_i(P_i) \quad (1)$$

$$H_i(P_i) = (a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i)$$

- a_i, b_i, c_i : 각 발전기의 비용계수
- P_i : 각 발전기의 출력
- f_{c_i} : 사용연료에 따른 연료비 단가
- $H_i(P_i)$: 발전기 i의 연료비용 함수

· 제약조건

$$P_{i \min} \leq P_i \leq P_{i \max} \quad (2)$$

$$\sum_i P_i = P_{demand} + P_{Loss} \quad (3)$$

- $P_{i \min, \max}$: 발전기 출력 상·하한치
- $\sum_i P_i$: 전체 발전량
- P_{Loss} : 계통 손실
- P_{demand} : 부하 요구량

· Tie-Line의 송전용량 제약조건

전체계통이 그림 1과 같이 지역적으로 분할되어 있는 경우, 각 지역을 연결하는 tie-line의 송전용량 한계에 관한 제약식을 포함하게 되면 식 (3)은 다음과 같이 변형할 수 있다[2].

$$\sum_{i=1}^n P_{a,i} \pm P^{TL} - P_a^D - P_{a,b}^L / 2 = 0 \quad (4)$$

1. 서 론

경제급전(ELD) 문제는 목적함수인 전체 발전기 비용함수를 부하요구량 및 발전기 출력 상·하한치와 같은 제약조건을 만족하도록 각 발전기 출력을 적절하게 배분하는 전력계통의 중요한 최적화 문제이다. 이러한 ELD 문제에 있어서 해석하고자 하는 전체계통이 지역적으로 분할되어 있는 경우에는, 각각의 지역을 상호 연계하는 송전선의 전력수송 능력이 중요한 제약으로 고려되어야 한다. 또한 실제적이고 정확한 계통운용을 위해서는 계통의 송전손실이 포함된 문제의 해석과 최근에 관심이 높아지고 있는 환경적인 영향 즉, 발전기로부터 전력의 생산시에 발생하는 오염원인 이산화탄소(CO₂), 이산화유황(SO₂), 질소산화물(NO_x)의 배출량 관계를 분석하여 계통을 운영하는 문제들이 필요하게 되었다[1,2].

본 논문에서는 여러 지역의 계통을 운용하고 계획함에 있어서 지역적으로 연계된 송전선의 송전용량과 전체계통의 전력손실을 고려하였다. 또한 환경적인 영향을 고려하기 위해, 발전기로부터 발생하는 각 오염물질 배출량이 최대 허용배출량 이하를 만족하도록, 오염원 배출함수를 제약식으로 포함한 ECED(Emission Constrained Economic Dispatch) 형태의 문제를 신경망을 이용하여 해석하였다. 계통의 손실은 조류계산의 결과를 이용한 B계수법을 사용하였으며 환경적 영향분석은 지역적으로 오염물질의 허용배출량을 설정하여 필요에 따라 계통의 선택적 운전이 가능하도록 하였다[3].

본 연구에서 최적화 기법으로 사용한 Two-Phase 신경망(TPNN)은 2단계를 통한 최적해 탐색을 실시하는데, 첫 번째 단계에서 빠른 속도로 최적값의 근방을 지역적으로 탐색한 후, 신경망의 내부구조를 바꾸어 두 번째 단계에서 실현가능 영역(feasible region)내의 모든 조건들을 만족하는 최적해를 얻는 알고리즘으로 구성되

$$\sum_{i=1}^m P_{b,i} \mp P^{TL} - P_b^D - P_{a,b}^L / 2 = 0 \quad (5)$$

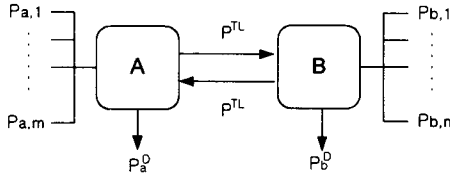


그림 1 계통 모델

여기서, $0 \leq P^{TL} \leq$ 송전용량한계
 $P_{a,b}^L$ 은 전체지역의 송전손실

2.1.2 환경적 문제의 정식화

CO₂, SO₂, NO_x의 배출량 함수는 발전출력에 따라 배출구(굴뚝)에서 직접적으로 배출량을 측정된 데이터를 기반으로 연료비용 함수의 2차함수 근사와 같이 curve fitting방법을 사용하여 각 오염물질의 배출곡선을 근사화한다. 따라서 오염물질의 배출량 함수는 연료비용 함수와 독립적으로 구성되므로 최적화 문제에 있어서 다음과 같이 배출량함수를 목적함수 또는 제약함수로 사용할 수 있게된다.

· 배출량함수를 목적함수로 사용하는 경우

오염물질의 배출량함수를 목적함수로 다음과 같이 정식화한다.

$$\text{Min } E_{i, total} = \sum_{i=1}^m e_i(a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i) \quad (6)$$

$E_{i, total}$: i 오염원의 총 배출량

e_i : i 오염원에 대한 배출량 상수

제약조건은 식(2.3)과 같다.

· 배출량함수를 제약함수로 사용하는 경우

식(1)의 목적함수와 식(2.3)의 제약조건에 다음과 같은 제약함수를 포함하여 정식화한다.

$$\sum_{i=1}^m e_i(a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i) \leq E_i^{\max} \quad (7)$$

E_i^{\max} : 오염물질 최대 허용 배출량

표 1 발전량배분 전략계획

No	전략기법	목적함수	SO ₂ 제약	NO _x 제약	CO ₂ 제약
1	Min. SO ₂	$\sum SO_i(P_i)$	-	-	-
2	Min. NO _x	$\sum NO_i(P_i)$	-	-	-
3	Min. CO ₂	$\sum CO_i(P_i)$	-	-	-
4	Min. Cost with NO _x , SO ₂ , CO ₂ Limit	$\sum H_i(P_i) \cdot f_c$	$\sum SO_i(P_i) \leq L_{SO}$	$\sum NO_i(P_i) \leq L_{NO}$	$\sum CO_i(P_i) \leq L_{CO}$
5	Min. Cost with NO _x Limit	$\sum H_i(P_i) \cdot f_c$	-	$\sum NO_i(P_i) \leq L_{NO}$	-
6	Min. Cost with SO ₂ Limit	$\sum H_i(P_i) \cdot f_c$	$\sum SO_i(P_i) \leq L_{SO}$	-	-
7	Min. Cost with CO ₂ Limit	$\sum H_i(P_i) \cdot f_c$	-	-	$\sum CO_i(P_i) \leq L_{CO}$
8	Min. Cost(ED)	$\sum H_i(P_i) \cdot f_c$	-	-	-

ECED문제에서는, 배출량 함수를 목적함수나 제약조건으로 사용하여 최적화 할 수 있으므로 오염물질에 따른 발전량 분배의 전략을 표 1과 같이 수립하여 경제적인 문제와 환경적인 영향을 분석한다[3]. 예로, 표 1에 의하면 단지 경제급전만을 원할 경우에는 전략 8을 선택하여 목적함수를 구성하면 되고, 마찬가지로 SO₂, NO_x, CO₂의 최대 허용배출량을 만족하는 경제급전을 원할 경우 전략 4를 사용하여 환경의 영향을 분석하게 된다.

2.2 ECED문제의 TPNN응용

TPNN은 제약을 갖는 문제의 최적해 탐색에 있어서, phase별로 내부의 신경구조를 변화시키는 구조로 되어 있다. 첫 번째 phase에서는 임의의 초기값으로 탐색을 실시하여 최적해가 실행가능 영역의 경계면에 존재하더라도 빠른 계산으로 최적해에 대한 근사값을 얻을 수 있다. 두 번째 phase에서는 신경망의 구조를 변경하여 유한값을 갖는 페널티뉴런의 다이내믹스를 정하고, 목적함수를 최소화하는 방향과 최적해가 만족해야 하는 Kuhn-Tucker 조건을 만족하도록 뉴런의 출력을 결정하여 최적해를 탐색한다[4]. TPNN의 ECED문제의 적용에 있어서는 각각의 발전기 출력식 및 여러 제약식을 뉴런으로 맵핑하고, 반복계산을 사용하여 발전기의 최적출력을 결정하게 된다. 표 1에서의 전략 4에 대한 TPNN의 반복계산시 발전기의 출력변화, 즉 뉴런의 다이내믹스는 식 (8,9)과 같으며 수렴조건을 만족할 때까지 변화한다.

First phase ($0 \leq t < t_1$)

$$\begin{aligned} \Delta P_i = & -\nabla C_T - s \left[\sum_{k=1}^m g_k^+(P_i) \nabla g_k(P_i) + \sum_{k=1}^m SO_k^+(P_i) \nabla SO_k(P_i) \right. \\ & + \sum_{k=1}^m NO_k^+(P_i) \nabla NO_k(P_i) + \sum_{k=1}^m CO_k^+(P_i) \nabla CO_k(P_i) \\ & \left. + (\sum_{j=1}^m P_j - P_D - P_{Loss}) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

여기서,

SO_k : $SO_k(P_i)$, NO_k : $NO_k(P_i)$, CO_k : $CO_k(P_i)$

SO_k^+ : $\max[L_{SO}, \sum_{i=1}^m SO_i(P_i)]$

NO_k^+ : $\max[L_{NO}, \sum_{i=1}^m NO_i(P_i)]$

CO_k^+ : $\max[L_{CO}, \sum_{i=1}^m CO_i(P_i)]$

$g_j = [(P_j - P_{j \min}) \text{ and } (P_{j \max} - P_j)]$

$g_i^+ = \max[0, (P_{j \min} - P_j) \text{ or } (P_j - P_{j \max})]$

Second phase ($t \geq t_1$)

$$\begin{aligned} \Delta P_i = & -\nabla C_T \\ & - \left[\sum_{k=1}^m \nabla g_k(P_i) (s g_k^+ + \lambda) \right. \\ & + (\sum_{j=1}^m P_j - P_D - P_{Loss}) ((\sum_{j=1}^m P_j - P_D - P_{Loss}) + \mu_1) \\ & + (\sum_{j=1}^m NO_j - \bar{L}_{NO}) ((\sum_{j=1}^m NO_j - \bar{L}_{NO}) + \mu_2) \\ & + (\sum_{j=1}^m SO_j - \bar{L}_{SO}) ((\sum_{j=1}^m SO_j - \bar{L}_{SO}) + \mu_3) \\ & \left. + (\sum_{j=1}^m CO_j - \bar{L}_{CO}) ((\sum_{j=1}^m CO_j - \bar{L}_{CO}) + \mu_4) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

발전기 뉴런의 출력은 페널티뉴런의 입력 값인 λ 와 μ 에 의해서 조절된다.

표 2 ECED 사례연구 결과

No.	SO ₂ Limit [kg/hr]	NO _x Limit [kg/hr]	CO ₂ Limit [kg/hr]	Tie-Line Flow[MW]	Loss [MW]	SO ₂ Emissions[kg/hr]		NO _x Emissions[kg/hr]		CO ₂ Emissions[kg/hr]		Total Cost [\$/hr] (case 3)	Total Cost [\$/hr] (case 2)	Total Cost [\$/hr] (case 1)
						Area 'A'	Area 'B'	Area 'A'	Area 'B'	Area 'A'	Area 'B'			
1	-	-	-	(-) 350	45.92	18.27	4.40	5.49	3.37	2664.42	1873.76	153551.0	163530.5	162859.4
2	-	-	-	(-) 350	43.83	19.95	5.96	4.69	3.02	2493.59	1873.15	154118.6	154257.5	152941.5
3	-	-	-	(-) 223.84	39.81	21.01	4.84	5.24	3.04	2577.85	1767.31	152982.6	152906.8	151688.2
4	23	5.5	3000	(-) 140.73	42.43	20.55	4.65	5.5	2.92	2809.25	1695.92	142384.5	142348.6	140966.7
5	-	5.5	-	(-) 209.23	43.04	20.40	5.07	5.5	2.98	2765.50	1750.83	142243.4	142245.1	140851.1
6	23	-	-	(-) 7.92	43.29	23	4.48	6.25	2.74	2960.21	1594.99	138778.1	138837.4	137454.1
7	-	-	3000	(+) 33.81	42.85	25.05	4.28	6.74	2.70	3000	1562.01	138060.3	138055.5	136685.6
8	-	-	-	(+) 350	46.31	27.80	3.36	7.67	2.34	3313.90	1321.80	132796.9	131642.5	130342.8

(+) : 지역 'A'에서 지역 'B'로의 송전, (-) : 지역 'B'에서 지역 'A'로의 송전을 나타냄.

$$\begin{aligned} \lambda_i &= \epsilon(sg_i^+) \quad , \quad \dot{\mu}_1 = \epsilon(s(\sum_j P_j - P_{demand} - P_{Loss})) \\ \dot{\mu}_2 &= \epsilon(s[\sum_j NO_j - \bar{L}_{NO}]) \quad , \quad \dot{\mu}_3 = \epsilon(s[\sum_j SO_j - \bar{L}_{SO}]) \\ \dot{\mu}_4 &= \epsilon(s[\sum_j CO_j - \bar{L}_{CO}]) \end{aligned} \quad (10)$$

Tie-line의 송전용량한계를 고려하기 위해서는 식 (8,9,10)내의 전력 평형식 대신에 식 (4,5)를 사용해서 새롭게 구성한다.

3. 사례 연구

본 논문에서는 송전용량 한계 및 송전손실 그리고 환경적 영향을 고려한 ECED문제를 해석하기 위하여 발전기 10대, 39모선의 New England test system을 2개의 지역으로 분할하여 사용하였다(5). 각 오염물질 및 발전기 데이터는 참고문헌(6)을 사용하였으며 발전량 배분 전략은 표 1을 사용하였다. 계통의 송전손실은 조류계산후의 B행렬 손실식(B matrix loss formula)을 이용하였다.

3.1 사례 연구 1

사례연구 1에서는 총부하 6000MW, 송전손실 및 tie-line이 없는 즉, 지역적 분할이 없는 단일 계통으로 구성하였다. 발전기 1번부터 6번까지 발생하는 오염물질의 최대 허용배출량은 CO₂, SO₂, NO_x 각각 3000(kg/hr), 23(kg/hr), 5.5(kg/hr)를 사용하였다. 각 전략별 모의시험 결과는 표 2에 발전비용만을 나타내었다.

3.2 사례 연구 2

사례연구 2에서는 사례연구 1과 같은 계통에 송전 손실을 고려하였다. 표 2에 발전비용 결과만을 나타내었다.

3.3 사례 연구 3

사례연구 3에서는 사례연구 1과 같은 계통에 송전 손실 및 tie-line의 송전용량 한계를 고려하였다. 전체 10기의 발전기를 갖는 전체계통을 각각 6대, 4대를 갖는 2개의 'A', 'B'지역으로 분할하고 2개 지역을 연결하는 tie-line의 송전용량 한계는 350MW로 하였다. 지역 'A'는 지역 'B'에 비하여 상대적으로 오염물질 배출에 관한 규제가 심하다고 가정하여, 'A'지역에 오염물질별로 허용배출 한계를 정하였으며 CO₂, SO₂, NO_x 각각의 허용배출량은 사례연구 1의 값과 같다. 모의시험 결과 환

경적 영향을 무시하는 경우(전략 8)와 CO₂만의 배출한계를 갖는 경우(전략 7)에서는 tie-line에 'A'에서 'B'로의 전력송전만이 발생하고 나머지 경우에 있어서는 반대의 경우를 확인할 수 있었다. 또한 각각의 경우에 있어서 배출량을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서는 여러 지역으로 분할된 계통에서의 tie-line의 송전용량제약과 최근에 관심이 높아지고 있는 발전기의 오염물질 배출에 관한 환경적 영향을 고려하였다. 이러한 최적 환경 및 경제운용에 관한 문제를 정식화하고 TPNN을 이용하여 분석하였으며 또한 실제적인 계통 해석을 위하여 전체 계통의 송전손실을 고려함으로써 발전비용의 변화를 살펴보았다.

송전용량과 오염물질을 세분화하여 발전량배분 전략계획을 결정함으로써, 송전용량과 CO₂, SO₂, NO_x 각각의 오염원 배출 한계에 따른 발전비용의 변화를 제시하였다. 따라서 본 논문의 결과와 같이 지역적 특성과 대기상태에 따른 최대 허용배출량을 각 오염물질별로 세분화하고 운용하는 목적에 맞게 발전량 배분계획을 수립한다면, 계통을 운영하는 운영자에게 좀더 선택적이고 유용한 정보를 제공할 수 있을 것이다.

(참고 문헌)

- [1] J.H.Talaq and Ferial and M.E.El-Hawary, "A SUMMARY OF ENVIRONMENTAL/ECONOMIC DISPATCH ALGORITHMS", IEEE Trans. on Power Systems, vol.9, pp1508-1516, August, 1994
- [2] T. Yalcinoz and M. J. Short, "Neural Networks Approach for Solving Economic Dispatch Problem with Transmission Capacity Constraints" IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 13, No. 2, pp307-313, May 1998
- [3] 이상봉, 김규호, 유석구 "진화연산과 신경망이론을 이용한 전력계통의 최적환경 및 경제운용", 대한전기학회, 전기학회논문지, 제48권 제12호, pp1498-1506, 1999
- [4] C.-Y. Maa and M.A. Shanblatt, "A Two-Phase Optimization Neural Network," IEEE Trans. Neural Networks, vol.3, pp1003-1009, Nov. 1992
- [5] Athay, T., R Podmore and S. Virmani, "A practical method for direct analysis of transient stability," IEEE Trans. on Power Apparatus and System, vol. PAS-98, no. 2, March/April 1979, pp. 573-584.
- [6] Tserje Gjengedai, Stale Johnsen, Oddbjorn Hansen, "A qualitative approach to economic environmental dispatch-treatment of multiple pollutants.", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, No.3 September 1992.