

# 신경회로망을 이용한 변전소 모선분리 방안 연구

이광호<sup>o</sup>, 황석영  
단국대학교 전기공학과

추진부, 윤용범, 전동훈  
한국전력 전력연구원

## Application of Neural Networks to the Bus Separation in a Substation

K. H. Lee, S. Y. Hwang,  
Dept. of Elec.Eng. of Dankook Univ.

J. B. Choo, Y. B. Youn, D. H. Jeon  
Korea Elec. Power Research Ins.

**Abstract-** This paper proposes an application of artificial neural networks to the bus-bar separation in a substation for radial network operation. For the effective bus-bar operation, the insecurity index of transmission line load is introduced. For the radial network operation, the constraints of bus-bar switch is formulated in the performance function with the insecurity index. The determination of bus-bar switching is to find the states of 0 or 1 in the circuit breakers. In this paper, it is tested that the bus-bar separation of binary optimization problem can be solved by Hopfield networks with adequate manipulations.

Bar)와 이들을 연결 또는 분리하는 차단기로 구성된다.

모선분리가 이루어지는 변전소는 그림 4에서의 5번 변전소와 같이 각각의 전원측 변전소와 연결되는 중심점의 위치에 존재한다. 모선분리에 의해 각 전원측으로부터의 송전 경로가 방사형 구조가 되기 위해서는 이 변전소에서 송전선로는 서로 연결되어서는 안된다. 따라서 주변압기는 모선을 통하여 각각 하나의 송전선로에만 연결되어야 한다. 이것을 3개의 변압기를 갖는 변전소에 적용하여 모형화하면 그림 1과 같고 이때의 스위치 S<sub>11</sub>~S<sub>34</sub>는 가상의 차단기로서 송전선로와 주변압기의 연결 상태를 나타내며 모선분리 운용시에 결정해야 하는 변수가 된다.

### 1. 서론

전력계통에서 345kv와 154kv 송전망은 주로 환상형 구조로 운용되고 있는데 이는 차단용량의 증가를 초래한다. 따라서 계통운전 조건을 크게 변화시키지 않는 범위에서 154kv 계통의 환상구조를 방사형 구조로 전환하는 체계적인 운용 방안이 연구되어야 한다.

계통의 방사형 운전을 위해서는 선로의 개방과 모선분리 운용이 사용되는데 모선분리는 선로개방에 비해 계통 상태를 보다 다양하게 변화시키는 특징이 있다. 이러한 다양성을 이용하여 계통을 방사형 구조로 전환하면서 동시에 선로의 부하율을 줄이기 위한 모선분리 기법을 제안하는 것이 본 연구의 목적이다.

본 연구에서는 방사형 계통 조건과 선로의 부하율을 나타내는 목적함수를 정의하고 최적화에 적합한 호필드 신경회로망을 구성하여 선로와 주변압기의 연결상태를 결정하는 기법을 제안한다. 사례연구 대상 계통은 중부전력소 관내 4개의 전원측으로부터 공급되는 13개 변전소 계통을 사용하였다.

### 3. 모선분리 문제의 정식화

효과적인 모선분리란 계통의 전원공급 경로가 전원측 변전소로부터 방사형으로 이루어지면서 선로 과부하 방지는 물론 최소의 선로 부하율을 갖도록 모선과 송전선로 및 변압기의 연결상태를 결정하는 것이다. 즉 과부하 상태까지의 선로조류의 여유를 최대로 하는 것이 목적이다.

선로의 부하율은 과부하 상태에 가까울수록 심각한 경우이므로 보다 큰 비중으로 평가함수에서 반영되어야 한다. 이를 위해 그림 2와 같은 sigmoid 함수를 사용하여 선로부하율에 따른 선로과부하의 발생 가능성을 수치로 나타내는 선로의 불안정성(insecurity)을 정의하였다.

### 2. 변전소에서의 모선분리 운용

변전소에서의 전력의 집중과 배분은 변전소 내부의 모선을 중심으로 이에 접속되는 선로와 변압기를 통해서 이루어진다. 변전소 내부의 모선은 여러개의 모선 마디(Bus-

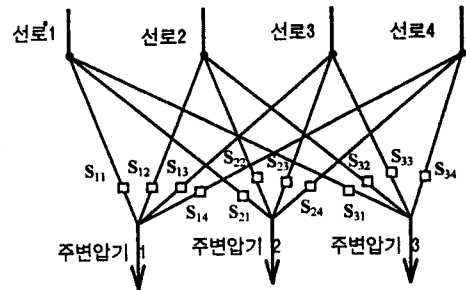


그림 1. 모선분리 운용 등가 모형도  
Fig. 1. Equivalence Model of Bus Separation

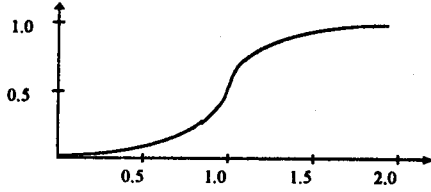


그림 2. 불안전성의 평가함수  
Fig. 2. Function of Insecurity Measure

각 선로 및 전체 평가함수와 방사형 구조를 의미하는 제약조건을 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Min } & \sum_i z_i \\ z_i = & \sum_j f(x_{ij}), \quad x_{ij} = \{P_{ij}^0 + P_{ij}(v)\} / P_{\text{cap},ij} \\ f(x) = & 1 / (1 + \exp \lambda(1-x)) \\ \text{s.t. } & \sum_k v_{1k} = 1, \quad \sum_k v_{2k} = 1, \quad \sum_k v_{3k} = 1, \quad v_k \in \{0, 1\} \end{aligned}$$

여기서  $I_s$ 는 대상 계통에서 모선분리 변전소와 연결 가능한 전원측 변전소의 개수를,  $N_i$ 는 모선분리 변전소에서 전원측 변전소  $i$ 까지의 구간(송전선로)의 개수를 의미한다. 또한  $P_{\text{cap}}$ 은 선로의 한계용량이므로  $x_{ij}$ 는 전원측 변전소  $i$ 로부터 모선분리 변전소에 이르는  $j$ 번째 선로의 선로부하율을 나타낸다.

주변압기와 송전선로 사이의 연결상태를 나타내는 스위치( $v_{ij}$ )에 대한 제약조건은 각각의 주변압기는 한개의 송전선로와만 연결상태가 되어야함을 의미하며 이로써 송전선로 간에는 어떠한 연결도 이루어지지 않는다. 따라서 전원측 변전소는 상호간에 연결이 되지 않아 방사형 계통구조를 이루게 된다.

#### 4. 호필드 신경망에 의한 최적화

결정해야하는 변수는 이진값을 갖는 모선분리 스위치 상태,  $v_{11} \sim v_{3n}$ , 이며 제약조건과 합성한 최소화 대상 함수에는 다음과 같이 선로의 불안전성 함수가 포함된다.

$$\begin{aligned} E = & \frac{\alpha}{2} \cdot \sum_i \sum_j \frac{1}{\{1 + \exp \lambda(1-x_{ij})\}} \\ & + \frac{\beta}{2} \cdot (1 - \sum_k v_{1k})^2 + \frac{\beta}{2} \cdot (1 - \sum_k v_{2k})^2 + \frac{\beta}{2} \cdot (1 - \sum_k v_{3k})^2 \\ x_{ij} = & \{P_{ij}^0 + P_{i1} \cdot v_{11} + P_{i2} \cdot v_{21} + P_{i3} \cdot v_{31}\} / P_{\text{cap},ij} \end{aligned}$$

여기서  $P_{ij}$ 는 변압기의 부하량이다. 이와같이 목적함수에 스위칭 변수의 2차항이 아닌 비선형 항이 나타나게 되어 1, 2차 항의 에너지 함수에 대해서 정의되는 호필드 신경망의 적용이 간단하지 않다. 본 연구에서는 sigmoid 불안전성 함수를 2차 근사화하여 전형적인 호필드 신경망의 구조와 수렴 특성을 갖는다. 2차 근사화에 따른 에너지 함수의 변형식은 다음과 같다.

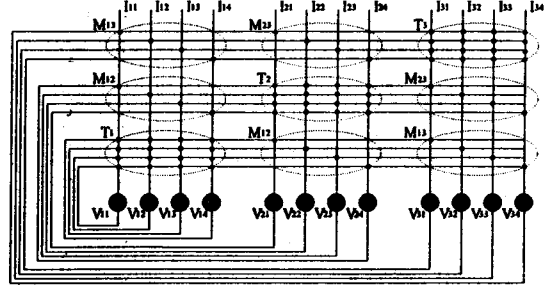


그림 3. 호필드 회로망 구조도  
Fig. 3. Diagram of Hopfield Networks

$$\begin{aligned} E' = & \sum_k \sum_i \left( \frac{\alpha}{2} c_i P_{ik} - \beta \right) v_{ik} + \sum_k \sum_i \left( \frac{\alpha}{2} d_i P_{ik}^2 + \frac{\beta}{2} \right) v_{ik}^2 \\ & + \sum_k \sum_i \sum_j \frac{\beta}{2} v_{ik} v_{jk} + \sum_i \sum_k \sum_j \frac{1}{j} ad_i P_{ik} P_{jk} v_{ik} v_{jk} \end{aligned}$$

여기서  $I_k$ 는 변압기의 갯수,  $c_i$ 는 sigmoid 함수 1차 근사항의 계수,  $d_i$ 는 2차항 계수이다. 다음과 같이 호필드 에너지 함수와 비교함으로써 신경망의 결합계수와 외부입력 등이 구해진다.

$$\begin{aligned} E_H = & -\frac{1}{2} \sum_i \sum_j T_{ij} \cdot v_i v_j - \sum_i I_i v_i \\ = & -\frac{1}{2} \begin{bmatrix} V_1 & V_2 & V_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{12} & T_{22} & M_{23} \\ M_{13} & M_{23} & T_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} I_1 & I_2 & I_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \\ V_i' = & [v_{i1} \quad v_{i2} \quad \dots \quad v_{in}] \end{aligned}$$

따라서 다음과 같은 계수 행렬이 유도된다.

$$\begin{aligned} T_k(i,i) = & (ad_i P_{ik}^2 + \beta), \quad T_k(i,j) = -\beta, \quad M_{pm}(i,i) = -ad_i P_{ip} P_{ik}, \\ M_{pm}(i,j) = & 0, \quad I_k = \left( \beta - \frac{\alpha}{2} c_i P_{ik} \right), \quad k=1, \dots, N_i \end{aligned}$$

이상과 같은 호필드 회로망의 구조를 개략적으로 나타내면 다음 그림 3과 같다.

#### 5. 사례연구

사례연구 계통으로는 중부전력소 관내 4개의 전원측과 연결되는 13개 변전소 계통이 사용되었다. 그림 4에서 모선 5는 전원측 모선 1, 2, 3이 연결되는 중심점에 위치하므로 방사형 계통 모선분리 운용에 적당한 모선이 된다.

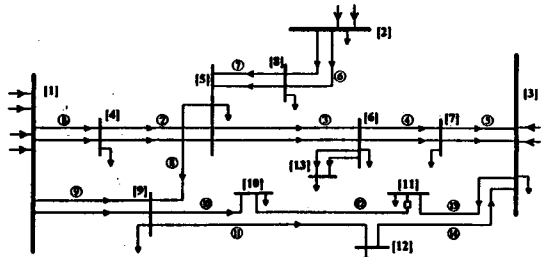


그림 4. 사례연구 대상 계통도  
Fig. 4. Network Diagram of Case Study

모선 5로부터 전원측 모선으로의 경로는 4개가 존재하는데, 경로 1은 전원 1과 연결되는 ①-②이고, 경로 2는 전원 2와 연결되는 ⑥-⑦이고, 경로 3은 전원 3과 연결되는 ③-④-⑤이고 경로 4는 전원 1과 연결되는 ⑧-⑨이다.

표 1. 선로조류 및 부하 데이터

Table 1. Line Power Load Data

선로번호	1	2	3	4	5	6	7	8	9
한계용량	230	228	228	228	228	169	228	272	160
초기조류	93.5	0	0	56.1	74.3	70.6	0	0	100.1

\* 변압기 부하 : Pt1=20.1, Pt2=15.5, Pt3=28.1[MW]

앞에서 설명한대로 3대의 변압기를 4개의 전원선로에 연결하는 문제이므로 전체 12개의 스위치가 있으며, 따라서  $2^{12} = 4096$  가지의 경우의 수가 발생한다. 그러나 부하공급조건, 변압기 운용조건, 계통의 방사형 조건등을 고려하면 경우의 수는 크게 줄어들어  $4 \times 4 \times 4 = 64$  개의 운용상태가 존재한다. 이러한 운용상태에 대해 불안전성을 살펴봄으로써 제한한 호필드 회로망에 의한 결과의 타당성을 검증할 수가 있다.

표 2. 운용가능 전체 경우의 불안전성 지수

Table 2. Insecurity index of total possible cases

111	0.0695	211	0.0524	311	0.0482	411	0.0994
112	0.0531	212	0.0799	312	0.0484	412	0.0996
113	0.0447	213	0.0442	313	0.0460	413	0.0911
114	0.1392	214	0.1387	314	0.1345	414	0.3379
121	0.0540	221	0.0580	321	0.0440	421	0.0952
122	0.0697	222	0.1433	322	0.0684	422	0.1196
*123*	*0.0431*	223	0.0559	323	0.0479	423	0.0930
124	0.1376	224	0.1504	324	0.1363	424	0.3398
131	0.0512	231	0.0455	331	0.0436	431	0.0924
132	0.0487	232	0.0790	332	0.0499	432	0.0987
133	0.0445	233	0.0475	333	0.0574	433	0.0944
134	0.1349	234	0.1379	334	0.1360	434	0.3371
141	0.0851	241	0.0794	341	0.0751	441	0.1937
142	0.0826	242	0.1129	342	0.0814	442	0.2000
143	0.0742	243	0.0773	343	0.0790	443	0.1916
144	0.2791	244	0.2821	344	0.2779	444	0.5701

표 2에서 홀수열  $ijk$ 는 1,2,3번 변압기가 각각  $ij,k$ 번 전원 선로에 연결된 것을 뜻하고, 짝수열의 값은 각 경우에서의 불안전성 지수를 나타낸다. 따라서 표시한 바와 같이 각각의 변압기가 각각 1,2,3번 전원 에 연결될 때 불안전성 지수가 최소가 됨을 알 수 있다. 이 경우에 대상계통 내에서의 선로들이 최대한의 균등 분포의 공급 여유를 갖게 된다.

다음 그림 5는 호필드 회로망에서 각 뉴런의 수렴과정을 시뮬레이션한 결과를 나타낸다.  $V_{11}$ ,  $V_{22}$ ,  $V_{33}$ , 뉴런은 1-상태로 수렴하고 나머지 뉴런의 상태는 0-상태로 수렴한다. 각 스위치 그룹에서 하나만이 ON 상태인 것은 방사형 계통 구조에 대한 제약조건을 만족하는 것이다. 또한 변압기 부하의 이러한 배분은 전체 경우에 대해 선로의 불안전성 지수를 조사한 표 2의 최적 상태와 비교할때 선로에서의 전력전송이 가장 안정한 모선분리 방안임을 알 수 있다.

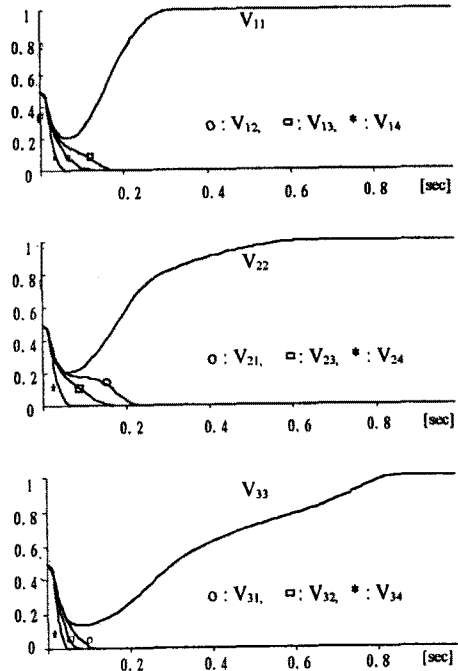


그림 5. 뉴런의 수렴 상태도

Fig. 5. Converging States of Neurons

## 6. 결론

본 논문은 호필드 신경회로망을 이용한 변전소에서의 모선분리 운용 방안에 관한 연구이다. 모선분리의 효율성을 정량화하기 위해 선로에서의 부하율에 따른 불안전성 (insecurity) 평가함수를 도입하였다. 따라서 방사형 구조를 의미하는 제약조건을 만족하면서 평가함수를 최소화하는 문제로 정식화된다. 수렴성이 우수한 호필드 신경망을 사용하기 위해서 비선형인 불안전성 함수를 호필드 에너지 함수 형태로 근사화하였으며 유도된 결합계수 등을 사용하여 사례계통에 적용하여 만족한 결과를 얻었다.

## 7. 참고문헌

- [1] 이광호, 박영문, "변전소의 모선분리 운용에 의한 선로 과부하 해소 연구," 대한전기학회 논문지, 제 44 권 10 호, pp.1252-1257, 1995.10.
- [2] James A. Freeman, *Neural Networks Algorithms, Applications, and Programming Techniques*, Addison-W Publishing Co. 1991
- [3] 이광호, 추진부, 윤용범, 전동훈, "방사형 계통을 위한 변전소 모선분리 방안 연구," 대한전기학회 대전지부 학술발표회 논문집, p42-45, 1995.12.
- [4] J.H.Park, Y.S.Kim, I.K.Eom, K.Y.Lee, "Economic Load Dispatch for Piecewise Quadratic Cost Function Using Hopfield Neural Network," IEEE Trans. on PS., Vol.8, No.3, 1993