

송전선로 개방에 의한 고장용량 저감 기법 연구

이광호 단국대학교

A Study on The T/L operation for suppression of Short Circuit Capacity

Kwang-Ho Lee Dankook University

Abstract - 전력계통의 고장용량 억제를 위한 송전망 구조의 방식상화는 경제적이고 적용이 간단하다는 장점을 갖는다. 그러나 선로개방에 따라 선로조류의 편중과 모선전압의 변동이 발생하기 때문에 계통의 안전성 검토가 전제되어야 한다. 본 연구에서는 고장용량의 감소를 목적으로 하면서 선로조류와 모선전압에 대한 제약조건이 반영되는 최적화 문제를 다룬다. 최적성의 향상을 위해서 호필드 신경망이 사용되며 이를 위해서 관련된 가중행렬 식을 유도한다.

1. 서 론

최근의 국내 전력계통에서는 고장용량의 증가로 사고 파급에 따른 위험성이 증가되어 계통보호 설비의 투자비 상승 요인이 되고 있다. 따라서 막대한 투자비용을 피하면서 고장용량을 감소시키는 연구가 요망된다.[1] 본 연구에서는 계통운용상의 현실성을 감안하여 운용 조건을 크게 변경시키지 않는 선로개방 기법을 제안 한다. 계통구조와 고장용량과의 상관관계가 매우 복잡하여 해석적인 표현을 구하기 어렵기 때문에 현재까지는 계통 운용자의 직관에 의존하여 운용되고 있다. 또한 선로의 개방에 따라 선로조류가 일부 선로에 집중되어 과부하와 전압 변동의 문제가 발생할 수 있기 때문에 계통의 안전성 해석이 반드시 수반되어야 한다.[2,3] 본 연구에서는 계통 안전성 해석을 고장용량의 감소와 동시에 고려하는 문제를 호필드 신경회로망(HNN)을 이용하여 해결하고자 한다. HNN은 일반적인 신경회로망과는 달리 뉴런의 가중치가 지정되어 변하지 않고 뉴런의 상태값이 과도현상을 나타내는 동특성을 갖는다. 이러한 뉴런의 에너지가 최소의 값으로 수렴하는 성질을 이용하여 일반적인 최적화 문제를 해결할 수가 있다.[4,5] 본 연구에서는 고장용량의 감소를 주목적으로 하면서 선로조류와 모선전압에 대한 계통 안전성을 고려하기 때문에 실제 계통 운용에서의 활용도가 높으며 변형된 2차 함수에 의한 에너지 함수를 유도함으로써 수렴된 결과의 수렴성을 향상시킬 수가 있다.

2. 문제의 정식화

2.1 선로개방에 따른 계통 영향

선로개방의 주목적은 차단용량 초과 모선에서의 고장 전류 감소, 즉 송전망 임피던스의 상승이고, 선로조류의 상승이 과부하를 초래하지 않는 점과 전압 감소가 한계 값을 넘지 않는 점이 제약조건으로 작용한다. 고장용량의 계산은 주로 3상 단락 사고시의 계통 임피던스에 의해 이루어지며 임의의 i번째 모선에서 사고가 발생하는 경우 모선 임피던스 행렬의 i번째 대각원소가 구동점 임피던스로 작용한다. 선로를 개방하는 경우의 구동 임피던스 변화식은 다음과 같다.[3]

$$Z_{ii} \approx Z_{ii}^0 + \sum_j d_{ij} \cdot s_j = Z_{ii}^0 + \Delta Z_{ii} \quad (1)$$

변수 s_j 는 선로j의 개방($s_j=1$)과 투입($s_j=0$) 상태를 나타내며, d_{ij} 는 선로j의 개방에 따른 모선i의 임피던스 증가량이다. 개방의 후보가 되기 위해서는 선로개방으로 인해서 계통이 분리되지 않아야 한다. 계통의 분리는 운용 면에서 매우 복잡한 문제를 초래하기 때문이다. 이러한 계통분리는 임의의 p-q 모선간의 선로를 개방할 때 선로j 양단의 전달 임피던스(Z_{pq})가 영이 되는 성질을 이용함으로써 간단히 판단할 수가 있다.[3]

선로의 개방은 계통의 모선 어드미턴스의 변화를 의미한다. 따라서 선로 어드미턴스 변화에 대한 전력방정식을 테일러 전개함으로써 선로개방과 전압 위상각의 변화 및 전압의 변화에 대한 관계식이 유도된다. 선로조류와 전압의 분리 특성(Decoupled)에 의해 다음과 같이 선로개방에 따른 선로조류와 전압에 대한 2개의 감도식으로 분리된다.[6]

$$P_k \approx P_k^0 + \sum e_{kj} \cdot s_j = P_k^0 + \Delta P_k \quad (2)$$

$$v_i \approx v_i^0 + \sum f_{ij} \cdot s_j = v_i^0 - \Delta v_i \quad (3)$$

여기서 P_k 는 선로k에서의 선로조류이고 v_i 는 모선i에서의 전압이며, e_{kj} 와 f_{ij} 는 선로j의 개방에 따른 선로k에서의 선로조류와 모선i에서의 전압 변화를 나타낸다.

2.2 최적화 문제의 표현

모선에서의 고장전류가 한계값 이하가 되기 위해서는 구동 임피던스가 기준치 이상이 되어야 한다. 또한 계통 안전성의 위해서는 송전선로에서 부하가 기준치 이하가 되어야 하며 선로 개방에 따라 모선 전압은 감소하므로 모선 전압은 기준치 이상이 되어야 한다. 이러한 조건을 각 항의 변화량에 대한 부등식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Z_{ii}^0 + \Delta Z_i > \bar{Z}_i &\Rightarrow \delta Z_i - \Delta Z_i < 0 \quad (\delta Z_i = \bar{Z}_i - Z_{ii}^0) \\ P_k^0 + \Delta P_k < \bar{P}_k &\Rightarrow \Delta P_k - \delta P_k < 0 \quad (\delta P_k = \bar{P}_k - P_k^0) \\ v_i^0 - \Delta v_i > \underline{v}_i &\Rightarrow \Delta v_i - \delta v_i < 0 \quad (\delta v_i = v_i^0 - \underline{v}_i) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 밑줄과 윗줄 표시값은 각 변수의 하한과 상한의 기준치를 나타낸다. 선로의 개방에 따라 항상 $\Delta Z_i > 0$ 이 만족되고 선로개방 이전에 식(4)의 임피던스 조건이 만족된 모선($\delta Z_i < 0$)에 대해서는 고장용량이 문제되지 않으므로 목적함수에 반영시킬 필요가 없다. 또한 HNN을 적용하기 위해서는 스위칭 변수(s)를 에너지 함수 형태로 나타내어야 한다. HNN에서 에너지가 2차 함수로 정의되므로 목적함수인 구동 임피던스 식을 2차 함수로 변형해야 한다. 그런데 만약 $(\delta Z_i - \Delta Z_i)^2$ 로 변형한다면 $\Delta Z_i > \delta Z_i$ 인 경우에 목적함수가 증가하게 되어 구동 임피던스를 증가시키려는 목적이 어긋난다. 본 연구에서는 이러한 현상을 방지하기 위해 2차 함수가 양의 방향으로 이동된 $(\delta Z_i - \Delta Z_i + x)^2$ 로 정의한다. 따라서 $\Delta Z_i > \delta Z_i$ 인 경우에도 목적함수가 감소하는 특성이 유지된다. 이동 파라미터 x의 결정은 $\Delta Z_i = 0$ 에서 함수의

기울기가 $10\delta Z_i$ 가 되도록 $x=4\delta Z_i$ 로 하였다. 식(4)에서의 선로조류와 모선 전압식은 실제로 제약조건이지만 HNN 문제로 변환하기 위해서 2차함수로 에너지 함수에 포함시킬 수 있다. 따라서 목적함수와 제약조건에 상대적인 반영 비율을 적절히 설정해야 하는 문제가 생긴다. 또한 선로의 개방은 계통신뢰성을 저해하고 근사식으로 유도된 (1)~(3) 식의 정확성을 감소시키므로 고장용량의 해소 범위 내에서 적을수록 바람직하다. 이러한 특성을 반영하여 제약조건이 합성된 에너지 함수를 나타내면 다음 식(5)와 같다.

$$E_p = \alpha \sum_{i \in R} (Z_{ai} - \Delta Z_i)^2 + \beta \sum_{k \in L} (P_{ak} + \Delta P_k)^2 + \beta \sum_{i \in T} (v_{ai} + \Delta v_i)^2 + \gamma (1 - \sum_{i \in S} s_i)^2 \quad (5)$$

여기서 α, β, γ 는 목적함수, 계통 안전성, 개방 선로 개수 함수에 대한 상대적 반영 비율을 정하는 파라미터이다. R, L, T, S는 각각 고장용량 초과 모선, 부하 변화 조사대상 선로, 전압 변화 조사대상 모선, 개방 가능 선로를 나타내는 집합이다. 또한 $Z_{ai}=5\delta Z_i$, $P_{ak}=K_p \delta P_k$, $v_{ai}=K_v \delta v_i$ 로서 식(4)에서의 선로조류와 모선 전압 조건식을 2차함수로 반영하면서 ΔP_k 와 Δv_i 의 음의 방향으로 K_p 와 K_v 만큼 이동시켰음을 나타낸다. 반복 시험을 통해 $K_p=1.0$, $K_v=0.05$ 로 설정하였다. 식(5)의 네 번째 에너지 항에서 γ 값이 클수록 단일 스위칭으로 수렴하는 특성을 나타낸다.

3. 호필드 신경회로망 적용

3.1 호필드 신경망 특성

HNN은 연상기의 장치가 발전된 형태로서 단일층의 뉴런들과 Recurrent, Feedback의 연결망을 갖는다. 일반적인 신경회로망에서 뉴런의 값에 따라서 가중치가 결정되는데 비하여 HNN에서는 가중치가 지정되어 변하지 않고 뉴런의 상태값이 과도현상을 나타내는 동특성을 갖는다. 가중치의 결정에 따라 뉴런 상태값의 수렴성이 좌우된다. 뉴런의 출력은 각각의 뉴런 입력부와 연결되는데 이때의 연결강도(T_{ij})는 양(+) 혹은 음(-)의 값을 갖는다. 뉴런 i의 입력(u_i)과 출력(v_i)은 시그모이드 함수관계에 있으므로 뉴런의 상태는 비선형 연립 미분방정식으로 표현되는 회로의 과도상태 시간응답을 계산함으로써 구해진다. HNN 회로에서의 에너지는 비선형 증폭기의 출력전압(v)과 입력전류의 곱으로 계산되며 이를 정리하면 다음 식(6)과 같다.[4,5]

$$E_H = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N T_{ij} v_i v_j - \sum_{i=1}^N I_i v_i = -\frac{1}{2} \mathbf{v}^T \mathbf{T} \mathbf{v} - \mathbf{I}^T \mathbf{v} \quad (6)$$

HNN 회로에서의 과도현상을 반영하여 HNN의 에너지 함수를 분석하면 항상 에너지가 감소함을 알 수 있다. 즉 HNN에서의 뉴런의 상태(v)는 에너지를 감소시키는 방향으로 변화하는 것이다. 따라서 응용 문제에서 결정 대상의 변수를 뉴런의 상태값(v)으로 대응시키고 최적 목적함수와 제약조건을 식(6)의 에너지 함수 형태로 변환함으로써 결정 대상의 변수가 최적 상태로 수렴하게 된다.

3.2 호필드 회로의 설정값 결정

본 연구에서는 선로 스위칭 변수(s)를 뉴런의 상태(v)로 대응시키고 문제의 에너지 함수식(5)을 HNN의 에너지 함수식(6)과 비교함으로써 HNN 회로의 설정값인 가중치 행렬 T와 외부 입력값 I를 다음과 유도하였다.

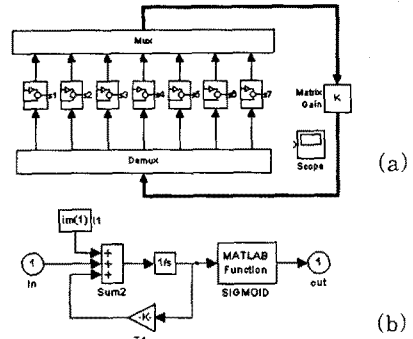
$$T_{mn} = -2\{\beta \sum_{k \in L} e_{km} e_{kn} + \beta \sum_{i \in T} f_{im} f_{in} + \alpha \sum_{i \in R} d_{im} d_{in} + \gamma\}$$

$$I_m = -2\{\beta \sum_{k \in L} P_{ak} e_{km} + \beta \sum_{i \in T} v_{ai} f_{im} - \alpha \sum_{i \in R} Z_{ai} d_{im} - \gamma\} \quad (7)$$

선로 스위칭 변수의 최적값을 결정하기 위해서는 HNN 회로에서 상태변수(v)에 대한 비선형 미분방정식을 계산해야 한다. 각 뉴런에서 입력과 출력을 전류상태로 표현하면 다음과 같다.[4,5]

$$C \frac{du_i}{dt} = \sum_j T_{ij} \cdot v_j - \frac{u_i}{R_i} + I_i \quad (8)$$

여기서 $1/R_i = 1/\rho + \sum_j T_{ij}$ 이며 정전용량 C는 파라미터 α, β, γ 에 비례하므로 사례연구에서는 $C=1$ 로 정한 후 α, β, γ 로서 수렴 특성을 조정하였다. 또한 ρ 에 의해서도 수렴특성이 달라지는데 검토 결과 $1/\rho$ 과 $\sum_j T_{ij}$ 이 비슷한 단위로 결정될 때 효과적으로 수렴하였다. 시뮬레이션은 MATLAB의 simulink에서 다음과 같은 블록의 구성으로 수행하였다. 그림(a)에서 7개 부분 블록은 각각의 뉴런을 나타내며 뉴런1(s_1)의 내부는 그림(b)와 같다.

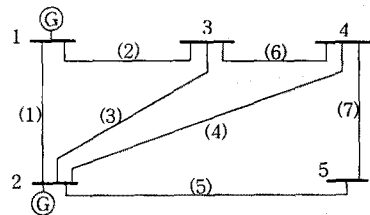


〈그림1〉 시뮬레이션 블록도

4. 사례 연구

4.1 대상 계통

사례연구는 다음 그림2와 같은 5모선 7선로 계통[7]에 적용하였다. 계통 데이터는 표1,2, 초기 상태에서의 조류계산 결과는 표3과 같다. 부하모선에 대한 고장전류의 한계값을 5pu로 설정하면 모선3에서 고장용량이 초과되므로 $R=\{3\}$ 이 된다. 선로조류의 한계값은 선로1에서 100MW, 나머지 선로에서 50MW로 설정하고 모선전압의 한계값은 전 모선에서 0.96pu로 설정한다. 전체 선로에서 과부하를 조사하므로 $L=\{1\sim 7\}$ 이고 모선전압은 부하모선에서만 변동하므로 $T=\{3,4,5\}$ 이고 선로개방으로 계통이 분리되는 경우가 없으므로 $S=\{1\sim 7\}$ 이다.



〈그림2〉 대상 계통도(5모선)

〈표1〉 대상 계통 데이터 〈표2〉 임피던스와 고장전류

선로	R[pu]	X	B/2
(1)	0.02	0.06	0.03
(2)	0.08	0.24	0.025
(3)	0.06	0.18	0.02
(4)	0.08	0.24	0.02
(5)	0.04	0.12	0.015
(6)	0.05	0.15	0.05
(7)	0.08	0.24	0.025

모선	Zii 고장전류[pu]
1	0.11503 8.69309
2	0.11584 8.63250
3	0.18679 5.35357
4	0.20801 4.80749
5	0.20855 4.79503

〈표3〉 초기상태 조류계산 결과

모선	전압	위상	Pg[MW]	Qg	Pl	Ql	선로 조류	(->) P[MW]	Q
1	1.05	0.00	119.9	36.5	0.	0.	(1)	1 2	80.2 23.9
2	1.02	-2.28	40.0	11.3	20.	10.	(2)	1 3	39.7 12.6
3	0.99	-4.59	0.0	0.	45.	25.	(3)	2 3	25.9 8.0
4	0.97	-6.15	0.0	0.	60.	25.	(4)	2 4	31.5 8.8
5	0.99	-4.82	0.0	0.	30.	10.	(5)	2 5	41.4 10.8
							(6)	3 4	18.9 -0.4
							(7)	5 4	10.7 1.7

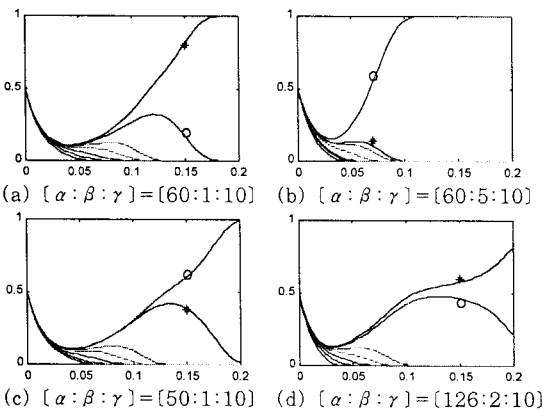
4.1 적용 결과

선로 개방에 따른 임피던스 변화계수(d), 선로조류 변화계수(e), 모선전압 변화계수(f)를 계산한 결과는 다음 표4와 같다.

〈표4〉 선로개방에 따른 변화계수

계수	선로1	선로2	선로3	선로4	선로5	선로6	선로7
d ₃	0.006	0.052	0.060	0.010	0.006	0.026	0.006
e ₁	0	0.390	-0.120	-0.060	-0.051	0.066	-0.017
e ₂	0.807	0	0.112	0.061	0.054	-0.058	0.016
e ₃	-0.500	0.206	0	0.096	0.085	-0.095	0.026
e ₄	-0.180	0.076	0.070	0	0.154	0.090	0.047
e ₅	-0.117	0.050	0.044	0.113	0	0.059	-0.091
e ₆	0.295	-0.117	-0.104	0.156	0.138	0	0.042
e ₇	0.115	-0.049	-0.043	-0.111	0.273	-0.058	0
f ₃	0	0.016	0.014	0.006	0.005	0.001	0.003
f ₄	0	0.008	0.007	0.016	0.012	0.013	0.008
f ₅	0	0.003	0.002	0.005	0.034	0.004	0.000

시뮬레이션을 수행할 때 결정해야 하는 파라미터로는 에너지 함수의 상대적 가중치인 α, β, γ 가 있다. γ 를 1으로 하였을 때 수렴성이 우수하였다. 이 값을 기준으로 α 와 β 의 상대적 비율에 따라 뉴턴들의 수렴 결과가 다음 그림3과 같이 상이하였다.



〈그림3〉 상대적 비율에 따른 시뮬레이션 결과

그림3은 7개의 선로스위칭 변수들의 수렴과정을 보이며 *는 선로3을, o는 선로7을 나타낸다. (a)에서는 선로3의 스위칭 변수만이 1에 수렴함을 보인다. 고장용량에 대한 가중치(α)를 증가시키면 결과는 동일하게 선로3만이 1에 수렴하지만 계통 안전성에 대한 가중치(β)를 증가시키면 수렴결과는 달라져서 그림(b)에서와 같이 선로7을 개방하는 것이 최적의 결과로 나타난다. 반대로 가중치 α 를 감소시켜도 그림(c)에서와 같이 선로7이 1로 수렴한다. 따라서 $\alpha:\beta$ 비율이 약 60:1 이상이면 선로3이 활성화되고 이하이면 선로7이 활성화되는 것으로 추정할 수 있으며 그림(d)에서는 이를 확인하기 위해 $\alpha:\beta$ 비율을 126:2로 하였을 때의 결과를 보인다.

역시 126:2 이상일 때는 선로3이, 이하일 때는 선로7이 활성화된다.

상기한 결과를 보이는 가중치 비율이 일정하지 않기 때문에 정확한 경계값을 구할 수는 없지만 상대적 가중치에 따른 수렴결과를 비교함으로써 본 연구의 타당성을 검증할 수가 있다. 선로3과 7이 각각 개방되었을 때의 임피던스와 계통상태를 계산하면 다음 표5와 같다.

〈표5〉 수렴결과와 비교 검증

개방 선로	고장용량(3)		선로 조류 [MW]							모선전압		
	Z ₃₃	전류	1	2	3	4	5	6	7	3	4	5
3	0.247	4.049	68.2	51.0	0	38.2	45.8	8.5	14.9	0.97	0.96	0.99
7	0.192	5.208	78.5	41.4	28.6	36.3	32.3	23.2	0	0.99	0.96	0.99

선로3이 개방된 경우 고장전류는 한계값 이하로 줄었지만 선로2에서 과부하가 발생되었고 선로7이 개방된 경우 전체 선로에서 과부하는 발생되지 않았지만 고장전류는 한계값을 약간 초과하였다. 따라서 그림3에서 α 값이 클 때는 계통 안전성보다는 고장용량 조건이 강하게 반영되기 때문에 선로3이 선택되고, β 값이 클 때는 계통 안전성이 강하게 반영되기 때문에 선로7이 선택된 것이 타당함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 송전선로 개방운용의 최적화에 호필드 신경회로망을 적용하였다. 송전망의 고장용량을 감소시키는 동시에 선로조류와 모선전압에 대한 안전성이 유지되는 가장 효과적인 개방 선로를 선택하도록 하였다. 선로 개방에 따른 임피던스와 선로조류 및 모선전압의 변화를 선형계수로 유도하고 2차 함수로 변형한 후 호필드 에너지 함수와 비교하여 호필드 신경회로망의 설정값을 유도하였다. 고장용량과 안전성 제약조건이 에너지 함수에 반영되는 비율을 상대적 가중치로 조절할 수 있으며 사례연구를 통하여 상대적 가중치에 따른 호필드 신경회로망의 수렴결과가 타당함을 검증하였다.

〈참 고 문 헌〉

- [1] 계통특성 개선설비 설치 타당성 검토 보고서, 한국전력, 1995.
- [2] 154kv 전력계통 방사상 운용방안 수립에 관한 연구, 한국전력, 1997.
- [3] 이광호, 이강완, 김준환, "고장전류 저감 선로개방 지원 프로그램 개발," 대한전기학회 전력계통연구회, 한국전기연구소, pp.125-128, 1998.
- [4] J.A. Freeman and D.M. Skapura, Neural Networks, Addison-Wesley, 1991.
- [5] H.Mori, N.Kitani, S.Tsuzuki, "Optimal Power Flow Calculation Using a Hopfield Net," Third Symposium of ESAPS, pp.328-335, Tokyo, Japan, April, 1991.
- [6] Y.M. Park and K.H. Lee, "Application of Expert System to Power System Restoration in Sub-control Center," IEEE Trans. on Power Systems, Vol.12, No.2, pp629-635, May, 1997.
- [7] Stagg and El-Abiad, Computer Methods in System Analysis, MGH, 1968.