

신경회로망을 이용한 On-line 과도안정도 평가에 의한 자동재폐로 무전압 시간제어 연구

김 일 동*
한전 전력연구원

박 중 근
서울대학교

(A Study on the Auto-Reclose Dead Time Control using Neural Network based
On-line Transient Stability Assessment)

Il-Dong Kim*
Korea Electric Power Research Institute

Jong-Keun Park
Seoul National University

Abstract

This paper presents a functional ability improvement of auto-reclosing relay in the power transmission line protection. When the high speed auto-reclosing is successful, Auto-reclosing is practically valuable to improve the transient stability limit of a power system, but it is fail due to surviving fault, both electrical and mechanical stresses can result on the transformers and turbine-generator. It is true that the longer dead time of the reclosing relay gives the higher rate of successful reclosing. On the other hand, the power system does not always need high speed reclosing because of enough stability margin. This paper proposed "stability margin based dead time reclosing" in order to decrease not only the rate of unsuccessful reclosing, but the possibility of the harmful stress also. On-line transient stability assessment using artificial neural network, for implementing the proposed scheme, has studied and tested with reasonable results.

1. 서 론

전력계통에서 보호계전기는 신속·정확한 사고제거를 통하여 계통안정유지와 설비피해 억제를 주목적으로 하여 사용한다. 전력계통에서의 사고는 대부분이 송전선에서 발생되며 그중 Flash-over에 의한 순간사고가 전체사고의 80~90%를 차지한다. 이에 대하여 송전보호계전시스템에는 사고검출계전기외에 자동재폐로 계전기를 부가하여 사고차단후 일정기간 무전압시간을 기다린후에 차단기를 재투입하여 비교적 짧은 시간내에 송전망 자동복구를 이루도록 제어한다. 이로서 계통안정도 및 공급신뢰도 유지와 설비 이용률 향상등 도모하는 효과가 있어 자동재폐로방식이 오래전부터 사용되어 오고 있다.⁽¹⁾

이러한 자동재폐로의 통계적 실패율은 약 20~35%정도이고 송전전압이 높아질수록 사고차단후에도 건전상으로 부더의 유도전압에 의해 사고점 아-크 소멸이 지연되거나, 2차 아-크발생 및 제투입시 높은 개폐서지(Switching Surge) 발생등으로 재폐로 실패 가능성이 높아 보다 긴 무전압시간이 요구된다. 지금까지 재폐로 성공을 보장하는 확실한 재폐로시간을 정하는 방법을 제시한 사례는 없으며, 사고점 아-크소멸현상의 경험적 자료에 의해 결정된 매우 짧은시간을 적용하여 사고시 과도안정도 유지 능력을 증대시키기 위해 소위 고속도 자동재폐로 방식이 일반적으로 사용되고 있다.

고속도 자동재폐로는 성공시 계통안정도 및 공급신뢰도 유지에 큰 효과가 있지만 실패시에는 악영향도 나타남이 밝혀졌으며, 특히 대용량 터빈-발전기에 축-비틀림충격이 발생되어 수명단축의 큰 요인이 되고 있다.

본 논문에서는 자동재폐로 개전기의 무전압시간을 지금과 같이 고정된 시간으로 하지 않고, 매 사고마다 당시의 계통 과도안정도 여유를 평가하여 그 값에 따라 시간을 제어할수 있는 "안정도에 의한 가변식 무전압 시간 재폐로 방법"도출과 구체적인 실현

가능 기법을 연구제시하였다.

2. 송전선 자동재폐로와 과도 안정도

2.1 송전선사고와 계통안정도

송전선 보호방식에서 자동재폐로 개전기를 사용하게된 이유는 송전선에서 발생하는 대부분의 사고가 순간적인 Flashover로 인한 사고인 것으로 부터 시작된다. 이러한 경우 선로를 차단하여 일정기간 무전압으로 두면 사고 부위의 아-크(Arc)가 소멸되고 이온화되었던 공기가 절연회복(Deionize)을 이루게 된다. 이러한 무전압시간후에 차단기를 부인(Close)하여 선로를 다시 연결하면 정상적으로 송전을 계속할 수 있게 되는 것이다. 오랜 경험을 통하여 자동 재폐로의 유익함이 인정되어 대부분의 전력회사에서 계통 계획이나 송전선로 개발시 고속자동재폐로 개전방식을 적용하는 것이 일반화되어 있으며 자동재폐로의 목적을 요약하면 다음과 같다.

- ① 순간사고의 경우 선로 자동 복구 운전에 의한 공급신뢰도 유지
- ② 계통 과도 안정도 유지 또는 향상 (고속재폐로시 효과가 큼)
- ③ 선로운휴기간 감소에 의한 설비 이용률 향상 및 전력손실 감소

그림-1은 양단에 전원이 있는 2개의 병렬 송전선로에서 사고 발생시 전력전송곡선과 전력에너지의 변화를 보인것이다.

사고발생순간(E)부터 제거되는 시점(H)까지 송전단 발전기 회전체에는 그림의 Area ①에 해당하는 만큼의 과도에너지(Kinetic Energy)가 발생되어 이것이 발전기를 가속시켜 운동에너지로 된다. H점에서 차단기(B)가 Open되어 사고가 제거되면 전송되는 전력은 J점까지 증가되고 이때부터는 사고기간과는 반대로 전송전력이 발전기의 기계적입력보다 크게된다. 회전체의 속도는 갑자기 변동될 수 없으므로 과도에너지가 완전히 흡수된 시점(Area ① = Area ②)인(O)점에 이룬후 부터는 발전기들이 과도한 위치에 도달한 상태이므로 위치에너지가 감소되는 방향 즉 곡선의 O-H부분을 따라 위상 각 δ가 감소되고 관성에 의한 역회전으로 N점에 까지 이른다.

각국 사고가 발생된후 전력전송곡선에 흔들림이 발생되기 마련이고, 계통의 위치를 나타내는 위상각 δ가 최대로 되는 점인 O점이 계통의 한계적 불안정 평형점인 N점에 가까이 갈수록 안정도 여유가 작아진다. 계통의 과도 안정도 여유를 높게 유지하기 위해서는 가능한한 O점이 N점에서 멀리 있어야 하며 그렇게 되기 위하여는 다음과 같은 조건이 필요하다.

- ① 송전단 회전체의 가속에너지저원이 되는 Area ①이 적은 것
- ② 과도운동에너지를 흡수할수 있는 계통의 허용 위치에너지 용량 즉 Area ②+③이 큰 것.

자동재폐로의 효과는 그림-1에서 보인바와 같이 Line A-B를 K점에서 재투입하여 성공하면 전력전송능력이 원상대로 복구되어 당초 O점까지 흔들려야 했던 위상각 δ를 N점까지만 흔들리도록 해주는 효과를 얻게되며, 반대방향으로의 흔들림도 당초의 S점에서 S'점으로 완화된다. 이렇게 과도 안정도 측면에서 볼때 Line A-B의 재폐로는 빠르면 빠를수록 안정도 여유를 더 크게 해준다.

간의 여유시간을 둔다. 이때 재배로 성공이면 자동복구 및 인정도 향상에도 유익하고 실패하면 1차 사고 충격에 이은 재차사고충격으로 전력설비의 수명이 감소되어 불리하다. 그림-3은 이러한 관계를 나타낸 것이다. 재배로하기 전에 성공 가능성 여부를 정확히 알수있는 방법은 없으며 단지 자동재배로의 성공율은 재배로 시간과 관련이 있고 재배로 시간이 길어질수록 성공율이 높아진다.

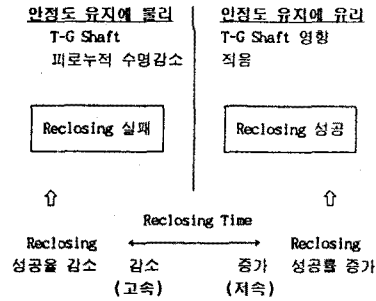


그림-3 자동재배로 성공/실패 문제

한편 계통과도 인정도도는 사고시마다 긴박한 것은 아니다. 당시의 송전선 조류 크기, 계통 구조 및 운전상태에 따라 여유도가 다르게 된다. 터빈-발전기 회전축에 발생하는 충격 피해는 당시의 인정도 여유와는 상관 관계가 없으나 고속도 재배로 실패시에는 결정적으로 피해가 크고 성공시에는 피해가 경미하다. 터빈-발전기의 회전축에 발생하는 비틀림 진동은 시간이 길어 따라 감소되므로⁽⁴⁾ 재배로 시간이 길어질수록 피해 정도가 낮아진다.

실제로는 계통의 피-크(Peak) 부하인 경우 또는 최대전력을 발전하는 때의 인정도도는 취약하나, 계통부하가 낮아질수록 인정도 여유가 커질 뿐만 아니라, 사고 송전선이 발전단에서 일어나 우회하는 회로가 많은 위치에 있는 경우에는 계통인정도에도 미치는 영향이 적어 그곳에 사고가 발생되더라도 인정도 여유는 있다.

예로서, 일반적인 전력계통의 부하율은 60~70%로써 최대부하로 운전되는 시간보다 그 이하에서 운전되는 시간이 훨씬 많게 된다. 따라서, 전력계통의 일상운전중에는 대부분의 경우 사고가 발생되어도 인정도에 여유가 있는 것을 감안하면 자동재배로 시간을 현재보다 더 길게 할 수 있어 재배로 성공율이 높아질 것이며 과도인정도 여유가 넉넉하여 그 사고 하나만으로는 재배로를 필요로 하지 않을 경우도 있게 된다.

이러한 관점에서 자동재배로 문제는 대략적인 경험만을 알뿐 정확한 정보가 부족하므로 불확실성이 있는 상황에서의 의사 결정문제로 볼 수 있다. 이런 문제를 해결하기 위한 경제학적인 접근방법중에 Laplace원칙과 Hurwicz원칙이 있는데⁽⁵⁾ 본 연구에서는 이 원칙들을 적용하여 자동 재배로 운용 방식을 수정 개선하였다. Laplace 원칙은 각 상태의 발생확율을 모두 동일하게 보고 기대보상액(Payoff)이 가장 큰 대안을 선택하는 것이며, 식-(4)로 표시되고, Hurwicz원칙은 비판적인 관점과 낙관적인 관점을 절충하여 의사 결정하는 것으로서 결정자로 하여금 상태발생에 대한 낙관지수(0 ≤ α ≤ 1)를 선택하도록하여 각대안들을 식-(5)와 같이 평가하여 가장 큰 값을 갖는 대안을 선택하는 것이다.

$$A = \max_i \sum_j P_{ij} \quad (4)$$

$$A = \max_i \{ \alpha \max_j P_{ij} + (1-\alpha) \min_j P_{ij} \} \quad (5)$$

여기서 A : 선택안

P_{ij} : 대안 i가 상태 j에 대한 보상(Pay off) 매트릭스 요소

$\max_j P_{ij}$: 보상치중 최대값

α : 보상치중 최대값을 얻을 수 있는 낙관지수

$\min_j P_{ij}$: 보상치중 최소값

(1-α) : 최소 보상을 얻을 수 있는 낙관지수

이들 규칙을 적용하기 위한 자동재배로와 관련한 상태발생(j) 종류는

j_1 = 사고재거후 계통이 안정하다. (절대안정)

j_2 = 사고재거후 계통이 반불안정하여 안정회복수단이 필요하다. (반안정)

j_3 = 사고재거후 계통이 불안정하다. (절대불안정)

이고, 이러한 상태에서 4개의 대안을 고려하였다.

A_1 : 송전선을 고속재배로 한다.

A_2 : 송전선을 저속재배로 한다.

A_3 : 발전기 연계선로는 저속/기타 선로는 고속 재배로 한다.

A_4 : 인정도 여유가 크면 저속/ 작으면 고속재배로 한다.

이중에서 A_4 가 본 논문에서 제시한 방법이며 이것들에 대한 보상 매트릭스는 다음표-1과 같다.

표-1 각대안에 대한 보상매트릭스(Payoff Matrix)

계통상태 낙관지수 대안	계통이 안정하다 (j_1)	반안정하다 (j_2)	계통이불안정하다 (j_3)	
		a_1	a_2	$(1-a_1-a_2)$
A_1 (고속재배로)	max	dR_1^i	R_1^i	bR_1^i
	min	$-a(1-R_1^i)$	$-a(1-R_1^i)-c(1-a)(1-R_1^i)$	$-a(1-R_1^i)-c(1-a)(1-R_1^i)$
A_2 (저속재배로)	max	dR_2^h	dR_2^h	dR_2^h
	min	0	0	0
A_3 (고속/저속 혼합)	max	adR_3^h	$adR_3^h + (1-a)R_1^i$	$adR_3^h + b(1-a)R_1^i$
	min	$-c(1-a)(1-R_1^i)$	$-c(1-a)(1-R_1^i)$	$-c(1-a)(1-R_1^i)$
A_4 (인정도여유 의존)	max	dR_4^h	R_1^i	bR_1^i
	min	0	$-a(1-R_1^i)-c(1-a)(1-R_1^i)$	$-a(1-R_1^i)-c(1-a)(1-R_1^i)$

규칙적용에서 원래의 Hurwicz원칙으로 부터 수정 및 보완 적용된 내용은 다음과 같다.

- ① max 요소는 재배로 성공시 유익성분, min요소는 재배로 실패시 불이익 성분으로 고려하였고
- ② 낙관지수는 계통운전 상태를 기준으로 고려하여, 각각 계통안정 낙관 지수: a_1 , 반안정 낙관지수: a_2 로함
- ③ 재배로성공률 및 성공시 효과계수등은 일반적인 통계치와 경험적인 값들을 사용하였다.

R_1^i : 고속도 지동재배로 성공률 (=0.7~0.8)

R_2^h : 저속 " " (0.85~0.9)

a : 전체 송전선로중 발전소 연계선로 점유율 (=0.2~0.3)

b : 계통불안정시 고속재배로 성공 효과 계수 (=0.1~0.2)

d_1 : 고속재배로 성공시 자동복구 효과계수 (=0.3~0.4)

d_2 : 저속 " " (=0.1~0.2)

c : 일반송전선로 고속재배로 실패시 피해계수 (=0.2~0.4)

a_1 : 과도인정도 여유가 높은 사고발생률 (=0.6~0.8)

a_2 : " " 낮은 " " (=0.1~0.2)

$$A = \max_i \{ \alpha_1 \max_j P_{i1} + \alpha_2 \max_j P_{i2} + (1-\alpha_1-\alpha_2) \max_j P_{i3} \}$$

$$+ \{ \alpha_1 \min_j P_{i1} + \alpha_2 \min_j P_{i2} + (1-\alpha_1-\alpha_2) \min_j P_{i3} \} \quad (6)$$

여기서, $\max_j P_{ij}$: 대안 i가 상태(j=1)에서의 유익한 보상

$\min_j P_{ij}$: 대안 i가 상태(j=1)에서의 불이익한 보상 (음수값을 기함)

각 식-(6)은 Laplace원칙과 Hurwicz 원칙을 혼합적용한 결과이며 각 대안에 대한 $a_1 = 0.8$, $a_2 = 0.125$ 인 경우의 대표적인 평가 결과는 그림-4와 같으며, 본 논문에서 제시한 인정도여유에 따른 기변속도 방식이 전반적으로 자동재배로 효과가 가장 큰 방안임을 알 수 있다. 단지 고속재배로 성공률(R_1^i)이 83%를 넘는 조건에서는 고속재배로 방안이 유리하다.

4. 인정도 평가기법

4.1 자동재배로용 인정도 평가요건

송전선 사고시 과도안정도를 평가하여 해당 송전선 자동재배로 개전기의 무전압 시간을 결정해 주기 위하여는 매우 신속한 과

도인정도 판정수단이 필요하며 다음과 같은 조건을 갖추어야 한다.

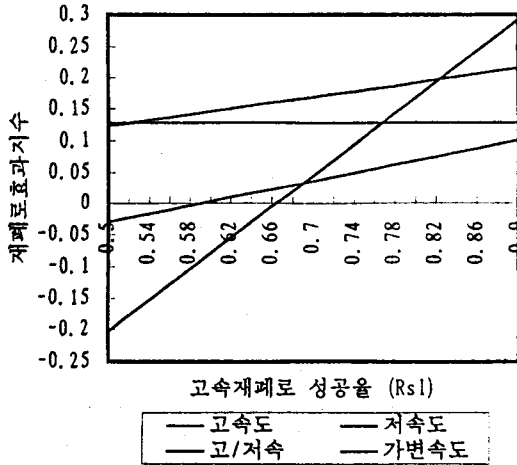


그림-4 재페로 방인의 효과 비교

- i) 과도 인정도의 고려기간은 수 ms~10초 이내이고 자동재페로서 시간은 고속의 경우 수백 ms~1초이내이기 때문에 평가속도가 충분히 빨라 On-line으로 평가되어야 한다.
- ii) 가능한 한 현장에 있는 정보를 이용하여 실용가능하며 간단한 할비로 판정가능할 것
- iii) 안정도 평가 결과가 안전/불안정 구분은 물론 안정도 여유도가 숫자로 표시될 수 있는 정량적 평가 방법이어야 한다.

4.2 안정도 평가와 신경회로망의 도입

과도안정도 평가기법에는 여러가지가 있으나 크게 보면 다음과 같이 4가지로 분류할 수 있다.

- 1) 수치적분법
- 2) Lyapunov 제 2방법에 기초한 적접법
- 3) 안정도 지수법
- 4) 패턴인식법

이중에서 앞의 3가지 방법들은 자동재페용 On-line에는 부적당하여 4번째의 패턴인식에 대하여 고찰한다.

과도안정도 평가를 위한 패턴인식법의 개념은 동적 움직임을 안정 또는 불안정으로 판정하는 결정규칙과 관련하여 사용될 수 있는 동적 움직임에 포함된 어떤 특징을 학습하므로 얻어지는 지식에 근거하는 것이다. 이 결정규칙은 운전상태에 의하여 결정될 수 있는 과도 안정계계를 정하는 것이다. 고전적인 일반 패턴인식 과정은 그림-5와 같이 3부분으로 이루어 진다.

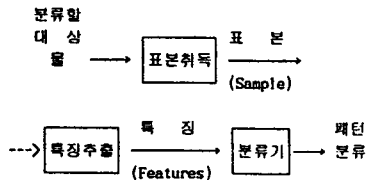


그림-5 패턴인식 과정

지금까지 패턴인식에 의한 안정도 해석연구에서는 표본취득에 의한 시스템표현, 특징추출 및 분류기 선택 및 설계에 집중적인 노력이 기울어져 왔다.

패턴분류를 하기 위한 한층 일반적인 접근방법으로서 신경회로망을 이용하는 것은 여러분야에서 이미 각광을 받고 있다. 본래 전력계통 안정도는 다수의 정보에 의하여 판정한다. 몇가지 대표적인 정보만으로 안정도를 판정하기 위해서는 계통이 가지는 동적특성에 대한 경험지식이 필요하므로 학습기능이 있는 수단이 필요하다. 아울러 신속한 판단을 내려야 하므로 수치연산방법보

다는 패턴 인식방법이 우수하고, 정보를 순차적으로 비교분석하여 판정하는 것 보다는 정보를 동시에 종합처리하는 병렬처리 방법이 우수하다. 따라서 본 연구에서는 학습기능과 병렬처리 기능이 있고 패턴 인식 기능이 우수한 것으로 알려진 신경회로망을 적용하였다.

전력계통에서는 1989, Sobajic과 Pao가⁽¹⁰⁾ 계통 안정도 평가에 신경회로망을 최초로 도입 적용하였으며, 오차 역전파 학습(Error Backpropagation Learning) 알고리즘으로 다층 퍼셉트론을 학습시켜 일개 시고제거시간(CCT)을 추론하였다.

특징변수로 사용된 입력 파라미터로는 사고발생순간에서의

- ① 각 발전기의 회전자 위상각
- ② 각 발전기의 가속 파라미터(Acceleration Parameters)
- ③ 각 발전기에 축적된 가속 에너지

들을 사용하였으며 신경회로망의 총 입력수는(발전기수×3)개가 소요되었다.

4기 6모선 작은 계통을 대상으로 실증된 결과는 매우 고무적이었으나 다양한 사고 구조와 사고위치에 대한 경우는 고려되지 않았다. 그리고 특징들을 얻어드리고, 유도하는데 시간 소요가 있었다.

CF Ahmad⁽¹¹⁾는 신경회로망을 사용하여 주파수 영역에서 과도 안정도를 평가하는 것과 On-line 측정으로부터 계통의 안정도 수준을 감시하기 위한 안정도 지수를 추론하는 방법을 연구 제시하였다. 전자 기계적인 동요를 주파수 영역에서 분석하므로 계통 안정도를 평가할 수 있음을 보였으며 특히 사고로 인하여 각 발전기 회전자에 발생된 과도운동에너지의 Power Spectral Density(PSD) 추정치 최대값이 계통안정도 판정하는데 특징변수로서 사용되었다.

또 신경회로망의 자체 고장에 대한 강인성을 확인한 결과 60%의 은닉층 유니트기 고장이라도 분류는 정확하게 이루어짐이 확인되어 신경회로망은 결함 허용특성이 매우 높다는 것이 입증되기도 하였다.

D.B Klapper and Y. Akimoto⁽¹²⁾도 신경회로망의 패턴인식 기능과 연산기능을 이용하여 전력계통안정도를 직접 구하는 방법을 연구 하였으며, 특징변수인 학습패턴 입력으로서 위치에너지(P_e), 운동에너지(K_e) 및 위치에너지의 변화(V_e)를 이용하였고 목표출력으로는 계통의 상대 에너지 마진(Relative Energy Margin)을 이용하였다. 패턴인식기법연구를 위하여는 가상 3모선계통에 대한 사례연구결과 신경회로망의 내삽 및 외삽 추론능력이 우수함을 확인하였으며, 종합적으로 안정도 평가를 정확히 하기 위하여는 해당되는 불안정 평형점을 찾아야 하는데 이문제 해결하기 위하여 최적화 접근법으로서 홉필드 네트워크(Hopfield Network)를 이용하였으며 각 발전기의 위상각을 입력자료로 사용하였다.

1994 Masahide Nishiura et al.⁽¹³⁾도 역시 신경회로망을 이용하여 안정도를 평가하는 방법을 제시하였는데 역시 안정한계차단시간(CCT)을 추정하는 것이었다. 입력으로 사용된 것은 여러 종류가 있으며,

- ① · 각 발전기 위상각 · 사고전 각 발전기 출력
- 사고직후 위상각 가속도 · 사고직후 " "
- ② · 사고직후 위상각 가속도(Angular Acceleration) 입력수 = 발전기수
- ③ · 사고발생후 0.1sec에서의 다음 Lyapunov 함수들 · 운동에너지(C_k) · 위치에너지 변화(V_p) · 위치에너지(V_p)
- 사고발생후 0.1sec 및 0.2sec에서의 ③번 입력
- ④ · 사고발생후 0.1sec, 0.2sec 및 0.3sec에서의 ④번 입력

학습에 대한 결과는 ④번의 3set의 Lyapunov 함수를 사용한 경우가 가장 정확한 결과를 보였으며, 각 case별 우열을 보면 ④→①→②→③의 순서이었다.

이상 발표한 지금까지 연구된 신경회로망을 이용한 과도안정도 평가는 실제계통에서 얻을 수 있는 원시정보로부터 운동에너지, 위치에너지, 위상각, PSD등과 같은 특징들을 추출하여 신경회로망을 통하여 안정도여부를 판정하는 방식이다. 그러나 이들 방법들은 실제계통에서 On-line으로 사용하는 정확도 문제와 정보 취득 및 가공을 위한 처리단계가 추가되어야하므로 On-line에 어려움이 있고 자동재페로에 적용할 수 있는 정량적 안정도 평가가 곤란하다.

4.3 정량적 안정도의 On-line 평가

앞에서 언급한 바와 같이 자동재폐로 무전압 시간 조정용 안정도평가는 정량적이며 On-line으로 평가되어야 한다. 본 논문에서는 이를 구현할 수 있는 방법으로서 과도에너지 함수(Transient Energy Function : T.E.F)에 의한 과도안정도 평가방법을 Model로한 신경회로망 학습법을 도입적용하였다. ¹⁴⁾ 안정도를 정량적으로 평가하는 방법중에는 T.E.F법에 가장 일반적으로 사용되고 있으며, 이 방법은 1기 무한대 계통에서의 등면적법을 다기계통에 적용한 것으로 볼 수 있으며, 그림-1에서 Area ③을 계산하여 안정도미진 또는 에너지 미진으로 보는 것이다.

따라서 특정변수 추출은 별도의 과정을 거치지 않고 T.E.F 법의 모체인 등면적법의 본래의 의미와 식-(5)로 표시되는 다기계통의 과도운동방정식의 의미로 부터 한정에서 얻을 수 있는 정보들 중에서 다음것들을 선택 사용하였다.

- ① 해당 송전선의 사고전 송전전력 (P)
- ② 사고지속시간 (Clearing Time : CT)
- ③ 사고전류 (양단전류) : I
- ④ 사고시 양단 전압 : V
- ⑤ 인근선로무전상태 : L

이것들은 그림-1에서 알 수 있는 바와 같이 ①, ②, ③, ④는 사고기간동안 발생한 과도에너지 Area ①을 형성하는 정보들이고, ①, ⑤는 계통이 흡수할 수 있는 위치에너지 Area ②+③를 추정하는데 가치가 있는 정보들이다.

$$M_i \frac{d^2 \delta_i}{dt} + D_i \frac{d \delta_i}{dt} = P_m - \sum_{j=1}^n E_j E_j (G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)) \quad (7)$$

식-(5)에서 각 특정변수들이 가지는 의미는 각각 ① → P_m, ② → ∫ dt, ③, ④ 및 ⑤ → E_i, E_j 및 G_{ij}, B_{ij}를 추정 할 수 있는 파라메터들이다.

선택된 특정변수들은 변전소 현장의 보호계전시스템으로 부터 쉽게 얻을 수 있는 정보들이다. On-line평가를 위한 도구로는 앞서 제시한 바와같이 다층퍼셉트론구조의 신경회로망을 사용하였으며 오차 역전파 학습알고리즘으로 학습시켰다.

이렇게 하였을때 도입되지 않은 정보는 식-(5)의 좌변에서 발전기들의 관성모멘트 M, 계통제동계수 D가 있으며, 우변에서는 E_i, E_j 및 B_{ij}, G_{ij}들이 영백하게 사용되지 않고 단지 사고질 양단의 오전전압, 전류와 양변전소간 에너지 유동에 가장 영향력이 있는 인근 송전선로(병행선로중)의 운전여부로 대신되었다. 따라서 신경회로망의 주요역할은 학습과정을 통하여 주어진 입력패턴과, 목표값(T)으로부터 도입되지 않은 계통의 동적 정보들에 해당하는 연결강도(Weight)들을 통하여 과도안정도미진(Em)을 맵핑(Mapping)해내는 것이며 다음식-(8)과 같이 표현할 수 있다.

$$Em = f_{NN}(P, CT, I, V, L, T) \quad (8)$$

4.4 안정도 여유(Margin)와 재폐로 시간

그림-1에서 등면적법에 의한 안정도 평가를 고려하면,

- e_k : 회전체에 추가된 운동에너지(Area①)
- e_p : 회전체가 얻은 위치에너지(Area②)
- e_m : 에너지미진(Area③)

이러 할때 계통의 과도 안정도는

$$\text{If } e_m > 0, \quad \text{Stable} \\ e_m < 0, \quad \text{Unstable}$$

본 연구에서는 보다 정확한 비교를 위하여 다음과 같은 정규화된 에너지미진(Em)을 사용한다.

$$Em = \frac{e_m}{e_k} = \frac{e - e_p}{e_k} \quad (9)$$

따라서, E_m = 1 이면, e_k = e_p = e_m으로서 발생한 사고와 동일한 규모의 사고를 한번더 수용할 수 있는 여유를 가지며

$$Em = 2 \text{ 이면 } e_k = e_p = 0.5 e_m$$

로서, 동일 규모의 사고를 2번더 수용할 안정도여유가 있음을 의미한다.

본 연구에서는 계통안전유지 개념에서 동일규모의 사고가 연속적으로 1회 추가될 수 있는 것으로 보고, 이에 여유를 두어 E_m=2를 분기점으로 하여 재폐로 무전압시간(tac)을 다음과 같이 고려한다.

$$0 \leq Em < 2 \text{ 이면 } t_{ac} = \left(\frac{10 - t_{ac}^*}{2} \right) Em + t_{ac}^* \quad (10)$$

$$Em \geq 2 \text{ 이면 } t_{ac} \geq 10 \text{sec(자속재로)}$$

여기서 t_{ac}* : 지금까지 사용되던 경험에 의한 고속재폐로시간

$$\left(\text{예 : } t_{ac} = \frac{kV}{34.5} + 10.5 \text{Cycles} \right)$$

5. 실증시험

5.1 실험대상 계통과 학습패턴

제시한 방법들을 실증하기 위한 대상계통으로는 전력계통 해석에서 벤치마크로 널리 사용되는 그림-(5)의 WSCC-9 Bus 계통을 이용하였다. Bus ①과 Bus ③ 간의 Line 7-5에서의 사고를 대상으로 하였으며 계통운전조건 및 사고조건은 변화는 선로조류를 55%, 70%, 85%, 90%, 100%로 변화시켰으며, 사고위치는 Bus ①을 기준으로 하였을때 최단단사고인 선로 양출단사고와 최원단사고인 Bus ③측 사고를 고려하였으며 사고종류는 3상단락사고만을 고려하였다.

PSS/E 계통해석패키지로부터 조류계산, 고장계산을 시행하고 T.E.F법에 의해 안정도 여유(Margin)를 산출하여 학습패턴으로 삼았으며 표-2와 같다. 안정도 크기에 가장 영향력이 두드러지게 나타나는 것은 고장제거시간(개전기 동작시간+차단시간)이며 이밖에 선로조류가 클수록 안정도 여유는 감소되고, 사고위치가 발전기로 부터 멀어질수록(사고전류가 적어지고, 발전단 Bus 전압이 높아짐) 안정도는 커짐을 알 수 있다. 학습패턴은 목표치인 안정도미진을 포함하여 9개정보로 구성되어 있다.

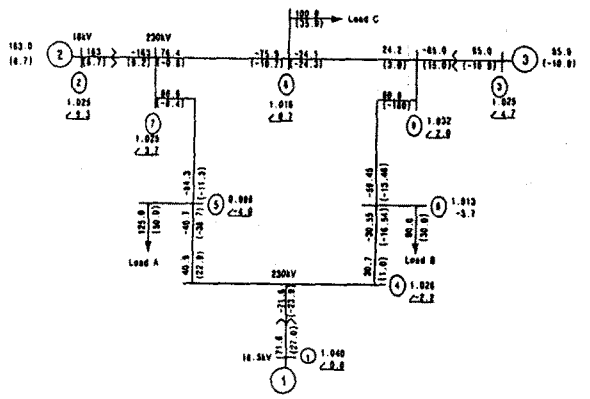


그림 - 6 WSCC-9 BUS TEST 계통

4.4 학습결과 및 무전압시간

학습에 사용된 신경회로망은 2개의 은닉층을 가지는 3층퍼셉트론이며 1번째 은닉층의 Unit수는 40개, 2번째 은닉층은 15개를

택하였다. 학습결과를 알아보기 위해 표-2의 학습패턴으로 학습 후에 표-3의 시험패턴으로 학습된 신경망을 시험한 결과는 표-3 및 그림-7과 같다.

표-2 과도안정도 학습용 패턴자료표

전역	인근선로	CT	전류		전압		안정도 마진 (E_m)	
			자단 ㉠	상대단 ㉡	자단 ㉢	상대단 ㉣		
81.4	-9.6	0	3	2124.2	648	0	56.3	12.4958
81.4	-9.6	0	6	2124.2	648	0	56.3	2.5448
81.4	-9.6	0	9	2124.2	648	0	56.3	0.5960
81.4	-9.6	0	12	2124.2	648	0	56.3	-0.1698
86.6	-8.4	1	3	2451.0	323.0	0	56.1	28.2173
86.6	-8.4	1	6	2451.0	323.0	0	56.1	6.3798
86.6	-8.4	1	9	2451.0	323.0	0	56.1	2.1356
86.6	-8.4	0	3	836.6	1417.9	74.5	0	29.4504
86.6	-8.4	0	6	836.6	1417.9	74.5	0	7.2955
86.6	-8.4	0	9	836.6	1417.9	74.5	0	3.1093
97.0	-5.6	0	3	2137.2	643.8	0	55.9	3.9807
97.0	-5.6	0	5	2137.2	643.8	0	55.9	0.9692
97.0	-5.6	0	9	2137.2	643.8	0	55.9	-0.3892

표-3 신경회로망에 의한 안정도 평가결과

전역	인근선로	CT	전류		전압		안정도		무전압시간 (t_{nc})	
			자단 ㉠	상대단 ㉡	자단 ㉢	상대단 ㉣	실제 (E_m)	시험치 (E_m')		
86.6	-8.4	0	2	2128	646	0	56.1	20.7954	21.39122	10.0
86.6	-8.4	0	5	2128	646	0	56.1	2.7118	2.35005	*
86.6	-8.4	0	10.0	2128	646	0	56.1	-0.2222	-0.1198	0.3
86.6	-8.4	0	12	836.6	1417.9	74.5	0	1.5413	2.1087	10.0
86.6	-8.4	0	19	836.6	1417.9	74.5	0	0.0073	-0.4182	0.3
86.6	-8.4	0	21	836.6	1417.9	74.5	0	-0.2749	-0.9432	0.3
91.0	-8.4	0	8	2132.9	645.2	0	56	0.125	0.0146	0.37
97.0	-5.6	0	7	2137.2	643.8	0	55.9	0.0485	-0.0249	0.3
97.0	-5.6	1	6	864.0	1392.0	74.9	0	3.28012	1.9351	9.34
97.0	-5.6	1	9	864.0	1392.0	74.9	0	1.2087	1.41226	7.15
97.0	-5.6	1	12	864.0	1392.0	74.9	0	0.3683	0.3521	2.1
97.0	-5.6	1	15	864.0	1392.0	74.9	0	-0.1043	-0.1270	0.3

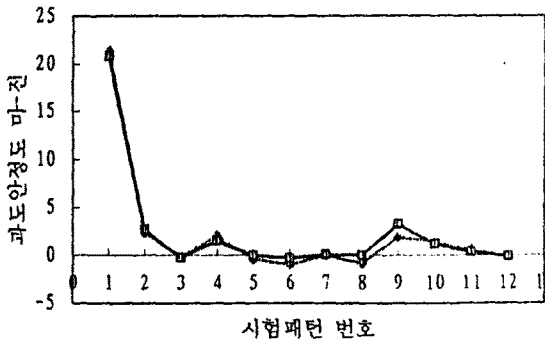


그림-7 시험결과(안정도 평가결과)

표-3과 그림-7은 적절히 학습된 신경회로망은 임의의 선로사고시 과도안정도를 정확하게 평가할 수 있음을 시사해 주고 있다. 표-3의 끝번째 열은 안정도에 의한 무전압시간이며 제시된 자동재폐로 무전압시간(t_{nc})이다.

5. 결 론

본 연구에서는 송전선 자동재폐로계전기의 무전압 시간을 안정도 여유에 따라 제어할 수 있는 On-line 안정도 평가기 Model을

제시하였다.

이 평가기는 몇개의 현상정보만을 이용한 것이며, 이들 정보에 내세워져 있는 전체 전력계통의 특성 정보를 신경회로망에 학습시키므로 실제 사고시 안정도를 계통특성에 맞추어 평가할 수 있음을 입증하였다. 안정도 평가에 필요한 정보로는 송전전력, 사고재개 시간, 사고종류, 사고전류 크기 및 인근선로 운전 상태를 사용하였다. 이것은 마치 전력계통을 직접히 축약시키므로서 몇 가지 정보로써 전체동현상을 추정할 수 있는 것으로 설명할 수 있다.

안정도 평가용 신경회로망 구조는 다층퍼셉트론이었고 학습알고리즘은 오차 역전파 학습 알고리즘을 이용하였다. 실증연구로는 WSCC-9Bus 계통을 대상으로 하였고, 학습 및 Test 결과 실용할 만한 정도의 정확도를 얻었다. 학습 패턴을 얻기 위한 안정도 평가는 안정도 여유율 정량적으로 평가할 수 있는 에너지 함수의 의한 과도 안정도 평가 기법을 이용하였다.

본 연구에서 제시한 실시간 안정도 평가기는 주요 송전선 자동재폐로 시간 제어에 적절히 활용될 수 있음을 물론 이 평가 결과 이용하면 최근 활발히 연구되고 있는 FACTS(Flexible AC Transmission System) 장치들을 제어하는 경우에도 계통안정도 여유에 관련하여 제어할 수 있는 기능을 부가할 수 있는 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- (1) Walter A. Elmore "Protective Relaying Theory and Applications" A9B power T & D Company Inc. Coral Spring, Florida 1994
- (2) R.W. Newcombe et al "Protective Relays Application Guide" Printed in Great Britain by the Sclar Press Limited, Menston, Yorkshire 1973.
- (3) M.C. Jackson et al "Turbine-Generator shaft Torques and Fatigue : Part I - Simulation Methodes and Fatigue Analysis" IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-98, PP2299~2307, Nov./Dec. 1979, Part I
- (4) John S. Joyce et al "Torsional Fatigue of Turbine-Generator shaft caused by Different Electrical System Faults and Switching Operations" IEEE Trans. Power App Syst., Vol PAS-97, PP.1965-1973, Sept./Oct. 1978
- (5) R.D.Dunlop et al "Turbine-Generator Shaft Torques and Fatigue : Part II-Impact of System Disturbances and High Speed Reclosure" IEEE Trans. Power App. Syst., Vol PAS-98, No 6 Nov./Dec. 1979
- (6) R.G. Coney "Autoreclosing Practices and Experience in ESKOM" CIGRE 1990 Session 34-202
- (7) "UHV 交流送電線におけるアーク消滅後の絶縁回復特性と高速度再閉路方式の適用" 研究報告 : W87049 PP.41~46, 電力中央研究所 昭和 63年 11月
- (8) Yutaka Goda et al "Insulation Recovery Time After Fault Arc Interruption for Rapid Auto-reclosing on UHV(1000kV Class) Transmission Lines" IEEE Trans, on Power Delivery PP 1060~1065, Vol. 10, No.2
- (9) 박경수(朴景洙) "공업경제학-경제성공학-" 탐출원시 1977 pp 317~328
- (10) D.J.Sobajic, Y.H.Pao "Artificial Neural-Net Based Dynamic Security assessment for Electric Power system" IEEE Transactions on Power Systems Vol. 4, No.1, Feb. 1989
- (11) C.F.Ahmad "Application of Artificial Neural Networks in Transient Stability Assessment and Security Monitoring of Power Systems" Purdue Univ. 1991
- (12) D.B Klapper and Y. Akimoto et al "Application of Neural Networks to Direct Stability Analysis of Power Systems" IEEE Proc. 2nd International Forum on Applications of Neural Networks to Power System 1993. pp 382-386
- (13) Masahide Nishiura et al "Transient Stability assessment using Energy Function and Neural Network"
- (14) J.D.Kim, C.Cauley "Transient Energy Function-Direct Version 3.0" User's Manual, Ontario Hydro Sept. 1991
- (15) 신대승, 김일동 "765kV 초고압 보호계전방식에 관한 연구" 한국전력공사 기술연구원 1994. 12