

# 1차측 케이블의 측면길이를 고려한 3상 변압기의 철공진 해석

조기선, 김근성, 김희철, 신종린

건국대학교 전기공학과

## Analysis of the Ferroresonance Characteristics in 3 Phase Transformer Considering Lateral Length of the Primary Cable

K.S. Cho, K.S. Kim, H.C. Kim, J.R. Shin

Dept. of Electrical Engineering, Konkuk University, Seoul, Korea  
irshin@kkucc.konkuk.ac.kr

**(Abstract)**

The ferroresonance characteristics in 3 phase transformer is analysed in this paper using EMTP simulations under the consideration of lateral length of the primary cable. The ferroresonant overvoltage or undervoltage may occur in cable-fed 3 phase transformer when single phase switching is made in relatively remote point from the transformer, and this phenomena is closely related to the lateral length of the cable. This paper shows the voltage characteristics concerned with the transformer ferroresonance and the proper lateral length of the cable for reducing the overvoltage in 3 phase installation, through some case studies

**1. 서 론**

최근 전력계통의 특성과 변압기 설계기술의 변화로 인하여 3상 변압기 설비의 스위칭시에 철공진에 의한 과전압이나 부족전압의 가능성이 증대되고 있다. 이러한 철공진 이상전압은 일정한 길이의 1차측이 케이블로 결선된 3상 변압기 뱅크에 경부하가 걸려 있을 때 원거리 단상스위칭이 이루어진 경우에 발생하기 쉽다. 철공진 전압은 찌그러진 형태의 파형을 갖기 때문에 전력의 질적문제를 야기시킬 수 있고, 계통에 연결된 장비들을 손상시킬 수도 있다.

철공진이 발생하는 계통 조건과 철공진 과전압의 형태는 많은 문헌에서 보고된 바 있다[1,2,3]. 이들 문헌에서 철공진에 의한 과전압의 가능성을 줄이거나 제거하기 위해서 제시한 방안으로는 케이블의 측면길이의 제한, 1차권선의 접지Y결선 사용, 1차 권선간 커플링이 없는 변압기의 사용, 2차권선에 적절한 부하연결, 그리고 3상스위칭 사용등을 제시하고 있다. 현재로서 가장 확실한 철공진 제거방법은 3상스위칭을 사용하는 것이다. 제안된 대안책들 중에 1차권선의 결선방식은 이미 적절한 대안책이 되지 못함이 밝혀졌고[2], 현장시험을 통해서 케이블의 측면길이에 따른 과전압 수준이 검토된 바 있다[2].

기본적으로 철공진 회로는 전원전압원과 캐패시턴스 그리고 비선형 인덕턴스의 결합으로 이루어진다. 전력계통의 경우에 있어서 전원전압원은 변압기의 개방된 상에 유기되는 전압이고, 캐패시턴스는 주로 지중케이블의 대지간 캐패시턴스, 그리고 인덕턴스는 변압기철심의 가포화 자화인덕턴스이다. 따라서, 계통에서 발생할 수 있는 철공진 전압은 전원전압과 캐패시턴스와 손실의 크기에 의해서 결정되며, 특히나 변압기의 여자곡선을 표현하는 비선형 인덕턴스 특성에 의해서 좌우된다.

최근 조사[4]에 의하면, 현재 실제계통에 시설된 변압기의 79%이상이 5각 내철형 변압기(5-legged core Transformer)라고 보고된 바 있다. 이러한 5각 내철형 변압기는 1차 권선간의 용량성 및 유도성 커플링이 존재하기 때문에 변압기 1차의 어떠한 결선방식을 통해서도 철공진을 막을 수 없다.

본 논문에서는 케이블을 통해서 전원이 공급되는 무부하 상

태인 5각 내철형 변압기가 원거리에서 단상 스위칭이 수행될 때, 발생하는 과전압과 케이블의 측면길이의 영향을 EMTP (Electro-Magnetic Transient Program)를 이용하여 해석하고자 하였다.

**2. 5각 내철형 변압기**

**2.1 5각 내철형 변압기의 구조**

5각 내철형 변압기(5-legged core transformer)의 전형적인 구조는 그림 1과 같다. 5각을 구성하기 위해서 4개의 적층철심을 맞붙혀 구성되었고, 각 상의 권선은 안쪽에 위치한 3각에 구성된다. 따라서 인접한 철심은 동일한 공통권선을 갖게 된다. 이 공통권선으로 인해서 3상중에 한상이나 두상이 여자 되었을 때에 나머지 상에 유기전압이 발생하게 된다. 이 유기전압은 계통의 다른 성분과 결합하여 과전압의 가능성을 만들게 된다.

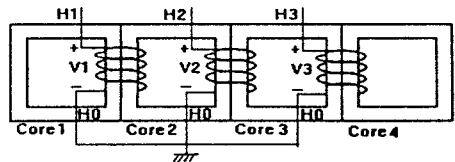


그림 1 5각 내철형 변압기의 구조  
Fig 1. Configuration of 5-leg core transformer

**2.2. 5각 내철형 변압기의 등가회로**

본 연구에서는 Mork가 제시한 등가회로[2]를 사용하였다. 등가회로구성을 위한 전압과 전류의 관계식은 다음과 같다.

$$V_1 = L_1 \frac{d}{dt} I_1 + L_2 \left( \frac{d}{dt} I_1 - \frac{d}{dt} I_2 \right) \quad (1)$$

$$V_2 = L_2 \left( \frac{d}{dt} I_2 - \frac{d}{dt} I_1 \right) + L_3 \left( \frac{d}{dt} I_2 - \frac{d}{dt} I_3 \right) \quad (2)$$

$$V_3 = L_4 \frac{d}{dt} I_3 + L_3 \left( \frac{d}{dt} I_3 - \frac{d}{dt} I_2 \right) \quad (3)$$

위 방정식을 통해서 등가회로를 구성하면 그림 2와 같다.

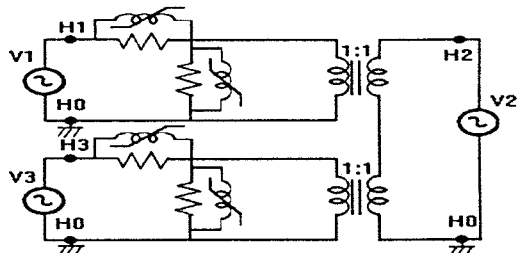


그림 2 5각 내철형 변압기의 등가회로  
Fig 2. The equivalent circuit of 5-legged core transformer

### 3. 계통조건과 철공진 현상

전력계통은 변압기의 포화요인을 고려할 때 비선형미분방정식으로 표현된다. 따라서 계통의 초기치에 의해서 그 응답은 크게 다를 수 있다. 예로서 차단기가 열려서 변압기가 차단되면 스위칭하는 순간에 따라서 그 전압은 거의 0이거나 아니면 높은 전압의 진동이 유지될 수도 있다.

철공진 회로는 LC직렬회로에만 국한되지 않고, 계통의 조건에 따라서 인덕턴스와 캐패시턴스의 복잡한 결합일 수 있다. 따라서 계통조건에 의해 철공진의 발생유무가 결정된다.

GY-GY 결선인 3상 변압기뱅크인 경우 3상 스위칭이 실시된다면 각 상은 대칭으로 타 권선에 전압유기가 발생하지 않으므로 순수하게 비선형 미분방정식의 성질만을 나타내게 된다. 그러나 케이블을 통해서 원거리에서 단상 스위칭이 이루어졌을 때는 다음과 같은 경우들을 생각할 수 있다.

i) 케이블이 단도체 차폐된 케이블인 경우  
이 경우에는 각 도체간의 커플링이 존재하지 않기 때문에 케이블의 상간 캐패시턴가 무시되며, 대지간의 캐패시턴스만이 영향을 미치게 된다.

ii) 3상 변압기 뱅크가 단상 변압기로 구성된 경우  
이때는 3상 변압기 뱅크의 1차측 권선간에 용량성이나 유도성 커플링이 존재하지 않기 때문에 단상 스위칭을 통해서 다른 1차 권선에 전압을 유기시키지 못하며, 3상 변압기 뱅크의 3상 스위칭과 같은 경우로 볼 수 있다.

iii) 3상변압기가 5각 내철형 변압기인 경우  
이는 3상변압기의 1차권선 사이에 용량성이나 유도성 커플링 존재하는 경우이다. 계통조건에 따른 변압기의 1차측에 용량성이나 유도성 커플링이 존재하지 않더라도 변압기 자체의 커플링에 의해서 LC공진회로를 구성하고 이에 따른 과전압이 발생할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 단도체 차폐된 케이블과 변압기의 1차권선간에 커플링이 존재하는 경우에 대해서만 중점적으로 다룬다.

단상스위칭에 의해서 개방된 상에 유기되는 전압은 (1),(2),(3)식에 의해서 구할 수 있으며, 개방된 상은 LC직렬공진회로를 형성하게 된다. 개방된 상에 유기되는 전압을  $V_s$  라하면, 개방된 상은 2계 미분방정식으로 표현될 수 있다. 여기서, 인덕터에 흐르는 전류는 자속의 함수( $i = f(\phi)$ )이므로 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} V_s = \frac{d^2}{dt^2} f(\phi) + \frac{f(\phi)}{C} \quad (4)$$

이때 캐패시터에 걸리는 전압은

$$V_c = \frac{1}{C} \int f(\phi) dt \quad (5)$$

이다.

#### 4. EMTP 시뮬레이션에 의한 철공진현상 해석

본 연구에서는 (4)식으로 주어지는 미분방정식을 아래와 같은 상황을 설정하여 EMTP 시뮬레이션을 통하여 철공진을 해석하고자 하였다.

##### 4.1 표본계통 및 사례설정

###### 계통구성

본 논문에서 선정한 모의대상 계통도는 그림 3과 같다. 단도체 차폐된 케이블과 1차권선간에 커플링이 존재하는 변압기를 사용하여 모의하였다.

모의대상 계통도는 무부하상태인 750MVA, 420kv/27kv, GY-GY 5각 내철형 변압기와 단상스위칭에 의한 과전압해석을 위해서 단상 차단기, 그리고 케이블회로로 구성되어 있다. 여기서 차단기는 Grading Capacitance를 갖지 않는 일반적인 차단기이고 케이블은 단도체 차폐된 케이블로 상간 캐패시턴스가 존재하지 않고 1000feet당 0.06μF의 대지간 캐패시턴스만을 갖는 회로로 구성된다.

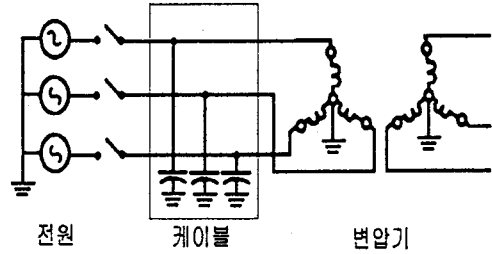


그림 3 모의대상 계통도  
Fig 3. The system for simulation

###### 사례설정

5각 내철형 변압기의 구조와 등가회로에서 알 수 있듯이 중앙 각(leg)에 대해서 대칭성이 존재한다. 따라서 한 상을 여자하는 경우와 두 상을 여자하는 경우에 대해서 각각 2가지의 사례가 발생한다. 요약하면 표 1과 같다.

표 1 모의절차  
Table 1 The procedure of simulation

	한상 여자	두상 여자
사례 1	중앙 leg 여자	/
사례 2	외측 leg 여자	/
사례 3	/	중앙 leg + 외측 leg
사례 4	/	외측 leg + 외측 leg

케이블의 캐패시턴스는 0.005μF에서 0.5μF까지 가변시키면서 모의한다. 케이블의 캐패시턴스는 1000feet당 0.06μF를 기준으로 환산하여 모의한다.

###### 시뮬레이션 등가회로

각 사례에 대해서 케이블의 캐패시턴스가 가변되는 동안에 개방된 상의 전압파형과 유사한 파형을 비교하는데 효과적인 위상평면도, 그리고 캐패시턴스에 대한 피크전압폭선을 도출한다. 각 사례에 대한 등가회로는 그림 4와 같다.

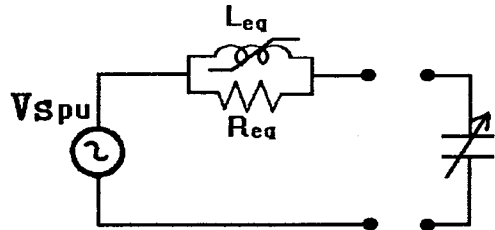


그림 4 테브난 등가회로  
Fig 4. Thevenin equivalent circuit

여기서 각 사례연구에 대한 등가회로의 매개변수값은 표 2와 같다.

표 2. 등가회로의 매개변수값  
Table 2. The value of the parameter for equivalent circuit

사례연구	1	2	3	4
매개변수				
등가전원(Vs) [pu]	0.5	0.5	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	$\frac{1}{\sqrt{3}}$
저항(Req) [R]	1.5	1.5	$\frac{4}{3}$	$\frac{4}{3}$
인덕턴스(Lcg) [L]	1.5	1.5	$\frac{4}{3}$	$\frac{4}{3}$

4.2 각 사례별 EMTP 시뮬레이션

사례 1 : 중앙 leg 여자

캐패시턴스값이 0.005 $\mu$ F에서 0.05 $\mu$ F까지는 초기에 과도상태를 거친후에 주기적이고 찌그러짐이 없는 파형이 나타났다. 캐패시턴스값이 0.005 $\mu$ F과 0.5 $\mu$ F일 때의 개방된 상에 나타나는 전압의 위상평면도를 그림 5에 나타내었다.

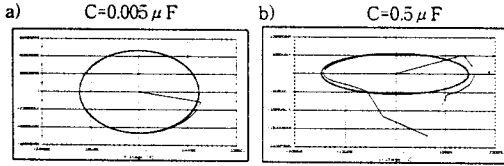


그림 5. 개방상(H1-H0)의 위상평면도  
Fig 5. Phase Plane on open phase(H1-H0)  
a) at C=0.005 $\mu$ F b) C=0.5 $\mu$ F

캐패시턴스의 값이 0.15 $\mu$ F를 넘어서면서 파형의 찌그러짐이 확인해지면서 전압파형의 진폭이 상하 비대칭의 형태를 나타낸다. 캐패시턴스가 0.15 $\mu$ F, 0.35 $\mu$ F, 그리고 0.5 $\mu$ F일때에 개방된 상 H1과 H0사이의 전압파형과 위상평면도를 나타내었다.

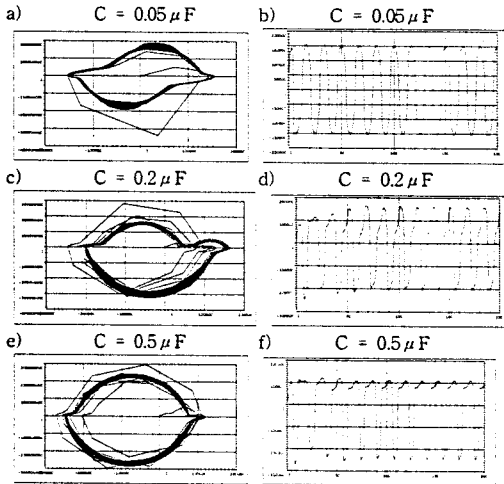


그림 6. 개방상(H1-H0)의 위상평면도와 전압파형  
Fig 6. Phase Plane and Voltage waveform on open phase  
a),c),e) Phase Plane, b),d),f) Voltage Waveform

중앙각이 여자된 경우에 개방상 H1과 H0사이에서 나타나는 전체 전압의 피크치를 그림 7에 나타내었다.

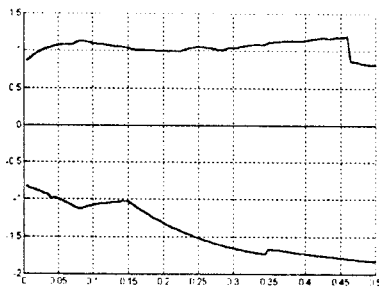


그림 7 사례 1의 결과  
Fig 7 The result of CASE 1

사례 2 : 외측 leg 여자

이 경우는 사례 1에서 모의한 등가회로와 동일한 등가회로를 갖고 있기 때문에 실제로 동일한 결과를 나타낸다.

사례 3 : 외측 leg + 중앙 leg 여자

H1과 H2사이에서 정격전압을 인가하고 캐패시턴스 0.005 $\mu$ F에서 0.5 $\mu$ F까지 증가시키면서 개방상인 H3과 H0에 나타나는 전압파형을 관찰하였다.

캐패시턴스값이 0.005 $\mu$ F 근처에서는 초기 과도상태가 나타나지만 주기적이고 완전한 정현파의 파형을 갖는다. 캐패시턴스값이 0.05 $\mu$ F을 지나면서 파형의 찌그러짐이 커지지만 초기과도 상태를 지나면 마찬가지로 주기적인 파형을 나타내었다.

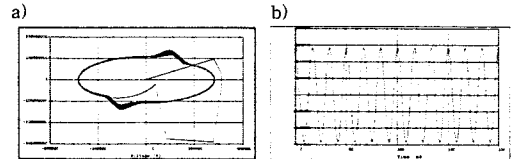


그림 8. C=0.05 $\mu$ F, 개방상(H3-H0)의 위상평면도와 전압파형  
Fig 8. Phase Plane and Voltage waveform on open phase at C=0.05 $\mu$ F a) Phase Plane, b) Voltage Waveform

캐패시턴스값이 0.15 $\mu$ F에서 0.2 $\mu$ F까지는 전압의 피크치가 줄어들면서 전압파형이 피크치 부분에서 찌그러진 상하 대칭인 전압파형을 보인다.

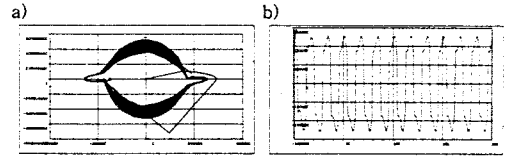


그림 9. C=0.2 $\mu$ F, 개방상(H3-H0)의 위상평면도와 전압파형  
Fig 9. Phase Plane and Voltage waveform on open phase at = 0.2 $\mu$ F a) Phase Plane, b) Voltage Waveform

캐패시턴스의 값이 0.35 $\mu$ F를 넘어서부터는 파형의 주기성을 찾아보기 힘들고, 지속적인 과전압의 형태가 나타남을 알 수 있다. 캐패시턴스의 값이 0.5 $\mu$ F일때의 전압파형과 위상평면도를 나타내었다.

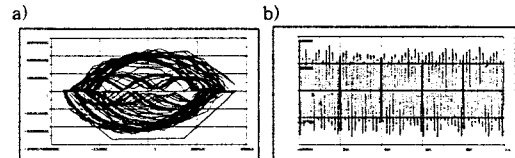


그림 10 C=0.5 $\mu$ F, 개방상(H3-H0)의 위상평면도와 전압파형  
Fig 10 Phase Plane and Voltage waveform on open phase at C=0.5 $\mu$ F a) Phase Plane, b) Voltage Waveform

H1과 H2사이에서 정격전압을 인가하고 개방상인 H3과 H0에 나타나는 전압파형을 전체 캐패시턴스의 변화에 대해서 그림 11에 나타내었다.

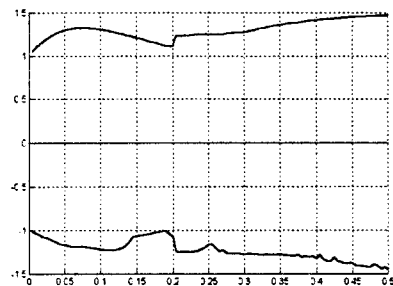


그림 11 사례 3의 결과  
Fig 11. The result of CASE 3

**사례 4 : 외측 leg + 외측 leg 여자**

H1과 H3사이에 정격전압을 인가하고 개방상인 H2와 H0에 나타나는 전압파형을 관찰하였다. 캐패시턴스가 0.005 $\mu$ F 근처에서는 사례 3의 경우와 유사한 결과를 보였다. 캐패시턴스 값이 더 증가함에 따라서 전압의 피크치는 점차로 증가한다. 캐패시턴스값이 0.075 $\mu$ F일때의 전압파형과 위상평면도이다.

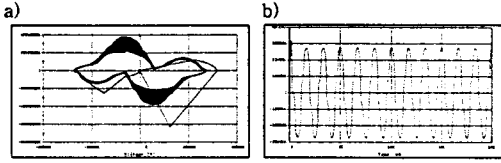


그림 12 C=0.075 $\mu$ F, 개방상(H2-H0)의 위상평면도와 전압파형  
Fig 12 Phase Plane and Voltage waveform on open phase at C=0.075 $\mu$ F a) Phase Plane, b) Voltage Waveform

캐패시턴스의 값이 0.26 $\mu$ F 근처에서는 다시 피크전압이 감소하고 파형의 찌그러짐이 피크치 근처에서만 관찰되었고, 캐패시턴스의 0.01 $\mu$ F 증가에 따른 전압파형의 형태는 크게 바뀐다. 초기에 전압파형의 찌그러짐이 두드러지게 나타났다.

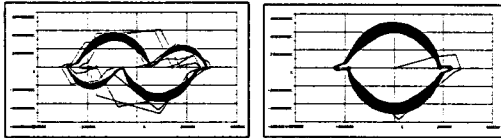


그림 13 개방상(H2-H0)의 위상평면도(C=0.26 $\mu$ F, C=0.27 $\mu$ F)  
Fig 13 Phase Plane on open phase at C=0.26 $\mu$ F, C=0.27 $\mu$ F

캐패시턴스값이 증가함에 따라서 초기의 찌그러진 파형이 점차로 전파된다. 캐패시턴스값이 0.5 $\mu$ F일때의 전압파형을 보였다.

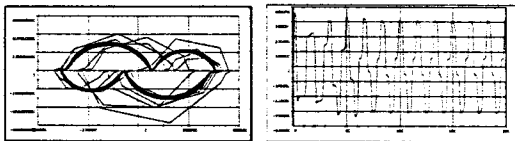


그림 14 C=0.5 $\mu$ F, 개방상(H2-H0)의 위상평면도와 전압파형  
Fig 14 Phase Plane and Voltage waveform on open phase at C = 0.5 $\mu$ F

H1과 H3사이에 정격전압을 인가하고 개방상인 H2와 H0에 나타나는 전압파형을 캐패시턴스의 변화에 대해서 그림 15에 나타내었다.

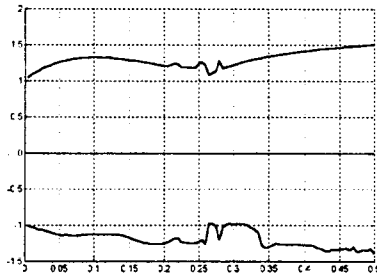


그림 15 사례 4의 결과  
Fig 15. The result of CASE 4

**4.3 결과 검토**

케이블의 캐패시턴스는 1000feet당 0.06 $\mu$ F으로 환산하여 계산한다. 철공진 과전압의 수준을 1.2pu이하로 제한하기 위한 각 사례에 대한 캐패시턴스는 다음과 같음이 밝혀졌다.

표 3 과전압을 1.2pu이하로 유지하기 위한 최대 캐패시턴스  
Table 3. Maximum capacitance for overvoltage is limited to 1.2pu

사례연구	1	2	3	4
캐패시턴스	0.175	0.175	0.02	0.05
$\mu$ F				

철공진 과전압을 1.2pu이하로 제한하기 위해서는 최대 케이블의 캐패시턴스는 0.02 $\mu$ F가 된다. 0.02 $\mu$ F를 길이단위로 환산하면 101.49m이다.

따라서 GY-GY결선인 3상 변압기가 케이블을 통해서 단상 스위칭이 이루어질 때 최대 101.49m이하로 케이블의 길이를 제한하면 철공진에 의한 과전압을 1.2pu이하로 유지시킬 수 있다. 또한 차단기의 종류 및 위치에 따라서 케이블의 캐패시턴스 및 계통의 캐패시턴스가 달라질 수 있기 때문에 환산된 길이는 계통조건과 밀접한 관계가 있다.

**5. 결 론**

본 논문에서는 1차권선간에 커플링이 존재하는 3상 변압기가 케이블을 경유하여 단상스위칭이 실시될 때, 변압기의 개방된 상에서 발생할 수 있는 철공진에 의한 과전압 특성을 EMTP를 이용한 모의를 통하여 해석하였다. 이 철공진은 계통의 조건과 밀접한 관계가 있기 때문에 계통의 여러 조건에 따른 다각적인 검토가 필요하다. 본 논문의 결과를 통해서 제한된 범위내에서 차단기의 종류 선정, 차단기의 시설위치 및 타 설비의 시설시에 충분한 고려가 이뤄져야 한다고 본다.

**(참 고 문 헌)**

[1] R. H. Hopkinson, "Ferroresonant During Single-Phase Switching of 3-Phase Distribution Transformer Banks", IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-84, No. 4, pp 289~293, April, 1965  
 [2] D.R. Smith, S.R. Swanson, and J.D. Borst, "Overvoltage With Remotely-Switched Cable-Fed Grounded Wye-Wye Transformers", IEEE Trans. On PAS-94, No. 5, September/October, 1975  
 [3] Dan D. Mairs, Don L. Stuehm, and Bruce A. Mork, "Overvoltages on Five-Legged Core Transformers on Rural Electric Systems", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 25, No.2, March, 1989  
 [4] B.A. Mork and D.L. Stuehm, "Application of Nonlinear Dynamics and Chaos to Ferroresonance in Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 2, April, 1994