creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[UCI]I804:24011-200000266568

2018年 2月
碩士學位論文

교류전기철도 단권변압기의 단락강도 및 시험방법 연구

朝鮮大學校 産業技術融合大學院

電氣技術融合工學科

李 珍 雨

2018年 2月 碩士學位論文

교류 전기철도 단권변압기의 단락강도 및 시험방법 연구

李 珍 雨

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

교류전기철도 단권변압기의 단락강도 및 시험방법 연구

A Study on the Short Circuit Strength and Test Method of Autotransformer for AC Electric Railroad

2018年 2月 24日

朝鮮大學校 産業技術融合大學院

電氣技術融合工學科

李 珍 雨

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

교류전기철도 단권변압기의 단락강도 및 시험방법 연구

指導敎授 曺 錦 培

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.

2017年 10月

朝鮮大學校 産業技術融合大學院

電氣技術融合工學科

李 珍 雨

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

李珍雨의 碩士學位論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 敎授 김 남 훈 印

委 員 朝鮮大學校 敎授 김 용 재 印

委 員 朝鮮大學校 敎授 조 금 배 印

2017年 11月

朝鮮大學校 産業技術融合大學院

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

<목 차>

ABSTRACT
Ⅰ. 서 론 1
Ⅱ. 이론적 배경 2
A. 전기철도 2
1. 전기철도의 전기방식 2
2. 교류 급전방식의 특징 3
B. 단권변압기의 급전계통 7
1. 단권변압기의 임피던스와 흡상효과 7
2. 단권변압기의 부하전류분포 9
3. 단권변압기의 절연강도 및 단락강도 14
C. 분리급전과 병렬급전 19
1. 분리급전 20
2. 병렬급전 21
Ⅲ. 단권변압기 단락강도 및 시험방법 23
A. 과부하내량 23
B. 단락강도 24
C. 단권변압기의 단락강도 및 시험방법 25
Ⅳ. 결론 35
참고문헌

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

<표목차>

표 1. Scott결선 변압기 권선수 ····· 4
표 2. 수·변전기기의 열적·기계적강도 ····· 16
표 3. 단권변압기의 정격용량과 단락전류 ····· 16
표 4. 국내 Scott결선 변압기의 표준용량 ····· 17
표 5. 주변압기 2차 최대단락전류와 단권변압기의 단락강도 비교 18
표 6. 주변압기 2차 최대단락전류와 단권변압기의 단락강도 ····· 25
표 7. 단락 후 권선평균온도의 최대 허용 값 ····· 26
표 8. IEEE Std C57.12.00-2000에서 단락전류에 대한 열적강도 값 ····· 27
표 9. JEC 2200(1995)에서 단락전류에 대한 열적강도 값 ····· 27
표 10. 변압기의 분류 ····· 33

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

<도목차>

그림 1. Scott결선과 전압 Vector도 ····· 5
그림 2. 단권변압기 중성점임피던스와 통신유도경감효과 ····· 9
그림 3. 단권변압기의 방면별 급전방식의 구성 ····· 10
그림 4. 전기차 1대가 단권변압기$_1$과 단권변압기$_2$의 중앙 통과 시 전류분포 ····· 10
그림 5. 부하점이 편중되어 있을 때의 전류 분포 ····· 11
그림 6. 단권변압기 2대의 부하전류의 부담 ····· 12
그림 7. 단권변압기$_1$, 단권변압기$_2$ 사이에 전기차가 2대 있을시 전류분포 ····· 13
그림 8. 전기차가 단권변압기$_1$과 단권변압기$_2$ 사이에 있을시 전류분포 ····· 13
그림 9. 전기차가 T_2가 단권변압기$_2$와 단권변압기$_3$ 사이에 있을시 전류분포 ····· 13
그림 10. 일반철도 분리급전계통의 급전구분소(SP) 결선도 ····· 19
그림 11. 고속철도 병렬급전계통의 급전구분소(SP) 결선도 ····· 20
그림 12. 일반철도의 분리급전 계통도 ····· 21
그림 13. 일반철도의 분리급전계통에서의 고장전류 분포 ····· 21
그림 14. 병렬급전 계통도 ····· 22
그림 15. 병렬급전계통의 고장 시 전류분포도 ····· 22
그림 16. 프랑스 PAUWELS 단권변압기 ····· 24
그림 17. JEC에 의한 단락강도 시험회로 ····· 32

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

A Study on the Short Circuit Strength and Test Method of Autotransformer for AC Electric Railroad

Jin Woo Lee
Advisor : Prof. Geum Bae Cho, Ph. D.
Electrical Engineering Technology Convergence
Industrial Technology Convergence
Graduate School of Chosun University

Short-circuit strength of a transformer is divided into thermal strength and mechanical strength. The thermal strength is related to the heat generation and temperature rise inside the conductor, which is the thermal performance of the short circuit. The mechanical strength is the strength to withstand the mechanical adaptability. The influence of direct current is also greatly affected by the short circuit. The autotransformer shall have a short-circuit strength enough to withstand the short-circuit current generated in the grid and shall pass a short-circuit strength test to demonstrate its reliability and performance. Therefore, the symmetrical short-circuit current, asymmetrical short-circuit current, short-circuit impedance, test current, test time and number of tests where required to be examined under the short-circuit strength test conditions. The test method for domestic electric railway system was proposed in this thesis.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ⅰ. 서 론

세계적으로 지구온난화, 에너지 위기 등과 같은 환경위기를 타개하기 위해 지속가능한 저탄소 녹색에너지 개발을 최우선 과제로 여기고 있다. 전기철도는 저탄소 녹색성장을 위한 높은 기대효과를 가지고 있으며 '녹색국토, 교통조성', '효율적 온실가스 감축' 등과 같은 정책에 부합할 것으로 예상된다. 교류전기철도는 단권변압기(autotransformer) 급전방식과 흡상변압기(booster transformer) 급전방식 및 직접 급전방식이 있다. 근래에 부하전류의 급증으로 인하여 대전력, 장거리 급전, 유도장해 측면에서 유리한 단권변압기 급전방식이 주로 사용되고 있으며, 고속철도 또한 이 방식이 적용되고 있다 [1]. 단권변압기 급전방식의 전기철도변전소는 교류 3상 154[kV], 60[Hz]를 수전해 급전변압기 2차 55[kV]측의 M상과 T상으로 각각 2개의 단상전압을 급전한다 [2]. 단권변압기는 급전선(auto feeder line) 및 전차선(trolley feeder line)과 레일(rail)의 3개선에 접속해 전기차에 전원을 공급하는 기능이 있고 구조적으로는 2권선변압기와 같이 1차 권선과 2차 권선으로 되어있지 않다. 또한 공통철심을 이용해 코일 2개를 감아 직렬로 접속해 1차 단자와 2차 단자를 인출한 변압기다. 변압기의 단락강도는 열적강도와 기계적강도로 나누어지며 열적강도는 단락회로의 열 성능인 도체내부의 발생열량 및 온도상승과 관계있으며, 기계적강도는 단락전류에 의한 전자력에 기인하는 기계적응력에 견디는 강도를 말하며 단락순시에는 직류분 영향을 크게 받는다 [2-3]. 단권변압기는 계통 내 발생하는 단락전류에 충분히 견딜 수 있는 단락강도를 갖춰야 하며 신뢰성 및 성능을 입증할 수 있는 단락강도시험을 통과해야 된다. 따라서 단락강도 시험조건에서 요구되는 대칭단락전류, 비대칭단락전류, 단락임피던스, 시험전류, 시험시간, 시험횟수 등의 적정치를 검토하였으며, 단락강도의 시험방법은 한국전기연구원의 시험기준에 부합하도는 국내 전기철도 시스템에 적용 가능한 방법을 제안하고자 한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ⅱ. 이론적 배경

A. 전기철도

1. 전기철도의 전기방식

a. 직류전기철도

직류전기철도는 전철변전소에서 일반 전력계통으로부터 수전한 특고압의 교류전력을 변압기를 이용해 적절한 전압으로 낮추고 실리콘정류기를 통해 직류로 변환하여 전차선로에 직류전력을 공급하는 방식이다. 직류전기철도는 세계철도의 약 48[%] 정도를 차지하고 있다. 직류전기철도의 사용전압 종류에는 600[V], 750[V], 1.5[kV], 3[kV] 등이 있으며 저압은 600[V], 고압은 1.5[kV], 3[kV] 등이 주로 사용되고 있다 [4].

b. 교류전기철도

교류전기철도방식에는 단상 교류방식과 3상 교류방식이 있는데, 교류철도는 1889년 스위스에서 최초로 3상 2선식 42[Hz], 750[V]방식으로 시작한 것이 처음이었다. 그 후 독일, 스웨덴, 노르웨이 등 유럽국가에서 16(2/3)[Hz], 15[kV] 교류전철을 보급하였으며, 최근에 들어서 50[Hz], 25[kV]와 60[Hz], 25[kV] 교류전철이 인도, 중국, 러시아, 프랑스, 영국, 일본에서 널리 보급되었다 [5]. 우리나라의 경우 단상 교류 60[Hz], 25[kV] 방식을 채택하고 있다. 단상 교류방식은 상용주파수의 고전압이 사용되기 때문에 근접해 있는 통신선로에 통신유도장해를 유도하게 되므로 이를 경감하기 위한 대책이 필요하다. 일반적으로 3상 송전선로로부터 전기철도용 단상전력이 수전되기 때문에 3상전원계통의 단락용량이 작은 경우에는 전압불평형, 전압변동 등의 문제가 발생하는

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

경우가 있다. 따라서 주전원 선정 시 주의가 필요하다. 3상 교류방식은 전차 선설비와 집전장치 등이 복잡하게 되며 전선 상호간의 절연으로 인해 전압을 높이는데 한계가 있어 일반적으로 전기철도에서는 사용되지 않고 있다. 교류방식은 급전방식에 따라 직접급전방식, 흡상변압기 급전방식 및 단권변압기 급전방식으로 분류한다. 국내 교류급전방식의 초기에는 산업선 전철에 흡상변압기급전방식을 채택하여 사용하였으나 흡상변압기 섹션의 아크소호나 유지보수 등의 문제점이 많아 최근에 들어 흡상변압기급전방식에서 단권변압기 급전방식으로 전환하고 있다 [6]. 교류급전은 직류급전과 비교해 전압조정이 용이하며 고전압을 이용할 수 있어 전류가 적다. 또한 전선의 동선 양을 저감할 수 있으며, 전력손실이 감소될 뿐 아니라 전압강하가 크게 감소해 변전소 간격을 늘릴 수 있고 대용량, 고전압의 수전전원을 공급받는데 비교적 용이한 장점이 있다.

2. 교류 급전방식의 특징

근래 전기철도에 적용된 교류급전방식으로는 상용주파의 27.5[kV]를 급전하는 흡상변압기 급전방식과 상용주파의 55[kV]를 급전하는 단권변압기 급전방식이 있다. 우리나라의 최근 신규사업은 모두 단권변압기 급전방식을 채택하고 있으며 기존의 흡상변압기 급전방식도 모두 단권변압기 급전으로 변환함으로서 단권변압기 급전방식이 주를 이루고 있다 [7]. 우리나라에서는 일본 철도기술의 도움을 받아 건설된 수도권의 전철 이후 일반철도에는 분리급전 시스템이 채택되고 있으며 이전에 유럽방식인 60[Hz]로 운용되는 기술의 도입으로 건설된 산업선 철도에서는 흡상변압기 급전방식으로 건설되다. 하지만 이 구간들을 모두 국내기술로 단권변압기 분리급전방식으로 개량해 재래선 모두 단권변압기 분리급전으로 변경 되었으며 경부고속전철에는 프랑스식 국유철도 SNCF에서 도입한 단권변압기 병렬급전방식을 채택하여 운행 중이다. 이후 건설된 호남고속철도도 단권변압기 병렬 급전방식을 적용중이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

a. 흡상변압기 급전과 단권변압기 급전

전력사의 3상 교류로부터 철도운전용의 단상전원을 얻기 위하여 단상 2권선 변압기를 채용하는 유럽의 방식과는 다르게 국내 철도의 경우 일본의 방식을 따라 수전용 주변압기를 Scott 결선해 2차 측에 M상 및 T상 변압기를 사용하고 있다. 또한 교류급전중 가장 취약한 점인 통신선유도장해를 저감시키기 위하여 흡상변압기급전방식을 채택하였으나 최근에 이르러 흡상변압기에서의 전압강하와 부스터섹션 아크문제를 개선한 무섹션화, 대용량의 열차운전, 변전소 간격 확대, 안정적인 전력공급이 가능한 단권변압기급전방식으로 개량하고 있다 [8].

우리나라 한전에서는 154[kV]±10[%]인 전압(170 ~ 138.6[kV])을 송전하므로 Scott결선 변압기의 1차 전압은 3상 154[kV]고 2차 전압은 흡상변압기급전계통에서 정격전압이 단상 27.5[kV]다. 단권변압기계통의 최고전압은 흡상변압기급전계통의 2배인 단상 55[kV]다. Scott결선 변압기 2차 권선에는 무부하전압탭(NLTC, no load tap changer)이 장착되 있는데 그 이유는 Scott결선 변압기의 1차 권선의 결선은 T결선으로써 T권선이 M상 권선의 중앙점에 연결되어 있기 때문이다. Scott결선 변압기의 1차 권선수 및 2차 권선수의 관계는 표 1에 나타내었다. T권선 1차 권선 수는 M상 권선수 0.866배로 권선수가 적어서 Tap수를 동일하게 하면 Tap간 권선수가 서로 상이하기 때문에 불평형이 발생하며 M상에 2개와 T상에 1개 등 3개의 전압절환기가 필요하다 [9-11]. 반면에 Scott결선 변압기의 2차 권선수는 M상과 T상의 권선수가 같기 때문에 전압절환기는 2개로도 충족된다.

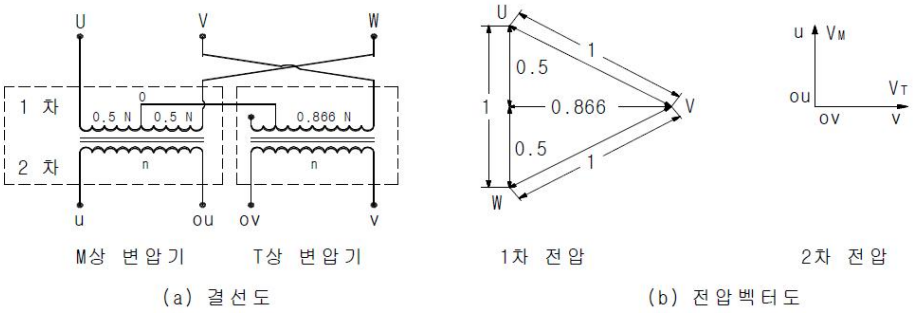
표 1. Scott결선 변압기 권선수

구분	1차 권선수	2차 권선수
M상 변압기	N	n
T상 변압기	$\sqrt{3}/2$ x N	n

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

따라서 절연강도 LIWL(Lighting Impulse Withstand Level)이 650[kV]에서 325[kV]로 저감되므로 우리나라는 Tap절환기를 Scott결선 주변압기의 2차측에 설치를 하고 있다. Scott결선 변압기의 결선과 전압의 크기 및 Vector관계는 그림 1에서와 같이 1차 권선과 2차 권선의 비가 N : n인 단상변압기 1대와 권선수의 비가 0.866 x N(= $\sqrt{3}/2$ x N) : n인 단상변압기 1대를 M상 변압기 1차 권선의 중앙점 0에 T형으로 결선된 것을 알 수 있다.



(a) 결선도 (b) 전압벡터도

그림 1. Scott결선과 전압 Vector도

이같은 결선 특성에 의해 Scott결선 변압기 2차에서 위상각의 차이가 90° 나는 M상과 T상 두 종류의 단상을 얻어진다. 따라서 전원용 Scott결선 변압기 2차의 무부하 전압Tap은 전전압 170[kV]일 때도 IEC의 최고 연속운전전압인 27.5[kV]를 초과하면 안되며 최저 수전전압인 138.6[kV]의 경우도 IEC의 최저 연속운전전압인 19[kV]보다는 낮지 않은 전압탭을 정격탭으로 선정해야 한다. 또 Scott결선 변압기에서 국내의 표준 급전방식인 단권변압기급전계통 전차선에 전력이 공급되는 지점에 설치된 중성구분장치(NS : Neutral section)는 무부하 시 주변압기 M-T상의 최대전압 29 x $\sqrt{2}$ = 41[kV]가 걸린다. 급전구분소 SP(sectioning post)는 양측 변전소 변압기의 위상차에 의한 전압만 걸려 그 전압은 크지 않을 것으로 예상되나 한쪽 변전소에 열차부하가 걸리는 경우 부하가 부담된 선로의 전압강하로 인해 높은 전압차가 발

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

생할 수 있다 [12-14]. 교류급전방식은 직류급전방식에 비해 전압 조정이 비교적 용이하기 때문에 고전압 급전이 가능하며 장거리 대용량 전력공급에 적합하기 때문에 간선 철도나 고속철도의 급전방식으로 채택되고 있다. 반면 직류급전은 1.5[kV]로 낮은 급전전압과 큰 급전전류 때문에 급전거리가 4~5[km] 정도다. 교류 흡상변압기방식은 급전전압이 27.5[kV]로 직류급전에 비해 고전압이지만 부하전류가 직류방식에 비해 약 1/10 정도 낮아져서 전압강하가 적기 때문에 동일 굵기의 전차선으로 급전변전소 간격이 20 ~ 30[km]로 길어진다. 또 교류 단상변압기방식은 흡상변압기 급전전압의 2배인 55[kV]의 급전전압으로 인해 변전소 간격이 40 ~ 50[km] 정도의 장거리로 경제적인 급전이 가능하다. 직류철도는 귀환전류 일부가 대지로 누설되기 때문에 지하에 매설된 금속관로나 금속 재질의 철제 구조물이 부식되는 전식작용을 일으키는 문제가 있으며, 교류철도는 귀환전류의 일부가 레일l에서 대지로 누설되어 통신선 유도장해가 발생하는 문제점 등이 있다 [15]. 통신유도장해의 방지를 위해레일의 누설전류를 감소시키기 위해서 고안된 방법은 흡상변압기 급전방식인데 레일에 흐르는 귀환전류를 흡상선을 이용해 흡상변압기 변압기와 별도로 가선한 부급전선(negative feeder)으로 귀환전류를 흡상하므로 레일의 전류를 감소시키는 방법이 채택되었다. 흡상변압기급전방식은 통신선로 유도장해를 줄이는데 탁월한 효과가 있으나 전기차 운행 시 흡상변압기 임피던스가 전차선로의 임피던스에 가산되면서 결과적으로 전차선로 임피던스가 증가해 전압강하가 커졌으며 흡상변압기의 양 단자 사이의 부스터 Air Section에서 흡상변압기 1차 단자 전압차로 인해 아크가 발생하는 등 문제점이 있었다 [16]. 따라서 이를 개선하기 위해 채택한 단권변압기 급전방식이 국내철도의 단권변압기급전 표준방식으로 채택되었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

B. 단권변압기의 급전계통

1. 단권변압기의 임피던스와 흡상효과

단권변압기의 누설임피던스(leakage impedance) 단위는 %임피던스와 단락임피던스(Ω)로 단독 또는 혼용해 표기하고 있다. 유도전압 계산이나 검토할 때 %임피던스 값을 적용하는 것은 어렵기 때문에 누설임피던스 값을 옴[Ω] 값으로 표기한다. 또 단권변압기누설임피던스는 통신유도장해 발생을 고려해 가능한 최소값을 적용해야하며 2차 측 단자에서 본 중성점 환산 누설임피던스는 0.1+j0.45[Ω]이하로 정하고 있다. 또한 %임피던스에 의한 표시가 필요한 경우 자기용량을 선로용량으로 환산해 표기한다.

단권변압기급전방식의 유도경감 효과를 Amp·km로 동일 등가 급전회로 부하조건에 있어서 Amp·km K_A는 I_T를 부하전류, 누설임피던스 Z_g를 단권변압기 단권변압기의 임피던스라 할 때 아래 식들과 같은 관계가 있다.

$$K_A = (nD + D_1) \times (1 + n_a) - (1 + N) \times \frac{Z_{12}}{Z_{22}} \times I_T \quad (1)$$

$$+ \frac{1}{Z_{bb}} + 2 \times (1 + N) \times \frac{D}{Z_{22}} \times (V_0 - V_m) \quad (2)$$

$$- (1 + N) \times (I_T + i_{c1} + i_{cm}) \times \frac{Z_g}{Z_{22}} \times D \quad (3)$$

여기서,

V_0, V_m : 레일전위 (0, m은 구간 기호)

Z_{aa}, Z_{bb}, Z_{cc} : 트롤리선의 레일(R), 급전선(단위 길이당의 대지 귀로 자기임피던스

Z_{ab}, Z_{bc}, Z_{ca} : (T-R), (R-F), (F-T)간 단위길이당 상호임피던스가 된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

위의 (1)은 부하전류에, (2)는 레일의 전압, (3)은 단권변압기의 누설임피던스 및 위치에 영향을 받는 항목이다. 따라서 통신선 유도장해를 경감시키기 위해서 다음과 같은 방법이 있다. ① 단권변압기의 설치간격 D를 짧게 하면 (1)이 적어지고, ② 단권변압기의 누설임피던스 Z_g를 적게하면 $V_0 \fallingdotseq V_m \fallingdotseq 0$이 되어 (2), (3)이 적어지며, ③ 전차선(contact wire), 급전선의 선종 및 배치 등을 고려해 이들 전선의 대지귀로 자기임피던스 $Z_{aa} \fallingdotseq Z_{cc}$가 되도록 가선을 하면 $(n_a - N \times \frac{Z_{12}}{Z_{22}})$가 적어져서 (1)의 값 전체가 작어지게 된다. 이와 같은 조치를 취하면 다음 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$K_A \fallingdotseq -(1+n_a) \times \frac{Z_g}{Z_{22}} \times D \times (I_T + i_{c1} + i_{1m}) \tag{4}$$

누설임피던스 Z_g를 eoeksgl 작게 하면 $i_{cm} \fallingdotseq 0$, $I_T \fallingdotseq -i_{c1}$이 되어 (2)에서 전 Amp·km가 최소값이 되기 때문에 결국에 단권변압기급전방식은 유도경감을 크게 할 수 있다. 실제로 전차선(contact wire)은 집전특성과 전류용량 등의 조건에 따라 사용전선의 종류나 가선배치가 정해지는데, 일반적으로 $Z_{aa} < Z_{cc}$의 관계가 되어 이것을 조정하는 것은 아주 어렵다. 단권변압기급전계통에서 실질적인 유도협조는 경제적인 단권변압기의 설계 및 배치가 필요한데, 누설임피던스 Z_g와 급전거리 D와의 조합을 통해 정해진다. Z_g를 일정 한도 이하로 적게 하여도 유도경감효과는 크게 나타나지 않고 비용이 상승한다. 그 이유에 대한 설명은 일본의 단권변압기시험 연구결과에 의해 알 수 있다. 그림 2에서 보는바와 같이 Z_g와 Amp·km의 관계에서 실제 단권변압기의 누설임피던스는 0.45[Ω]이 적당한 것으로 나타났다 [2].

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

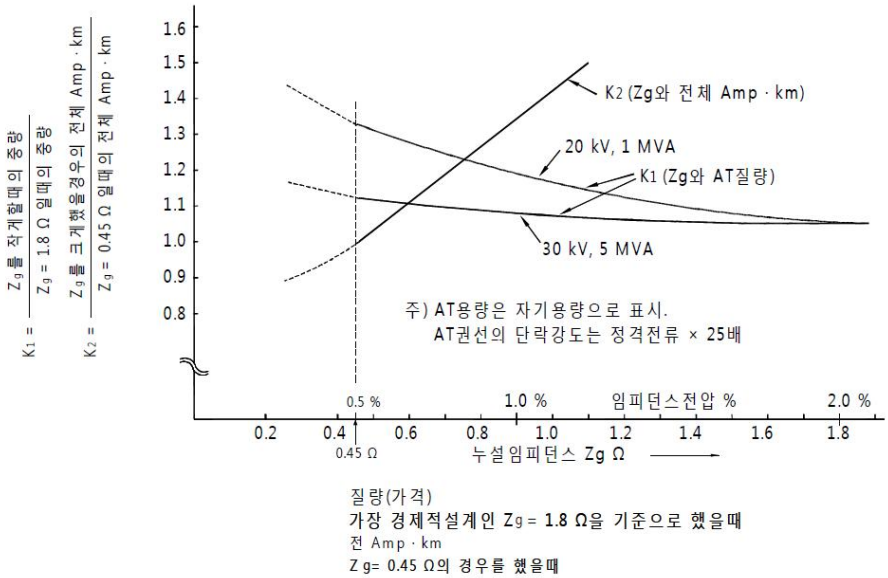


그림 2. 단권변압기 중성점임피던스와 통신유도경감효과

단권변압기의 1차 권선수, 2차 권선수가 동일한 경우에 1차, 2차 권선에 크기가 같고 방향이 반대인 전류가 강제로 흐르게 하는 방식을 단권변압기흡상효과 또는 흡상현상이라고 부른다. 단권변압기의 흡상효과는 레일에 흐르는 전류를 전차선 및 급전선에 흡상하여 레일에서 대지로의 누설전류가 최소화되어 통신선의 유도장해를 경감할 수 있다.

2. 단권변압기의 부하전류분포

단권변압기 급전방식은 그림 3에서와 같이 변전소(SS)에서 전기차 정격전압의 2배의 전압이 급전되며 선로를 따라 약 8 ~ 10[km]마다 설치된 단권변압기에 의해 급전전압을 절반으로 강압해 단상 교류 27.5[kV], 60[Hz]인 정격전압 및 주파수로 전기차에 전력을 공급하는 방식이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

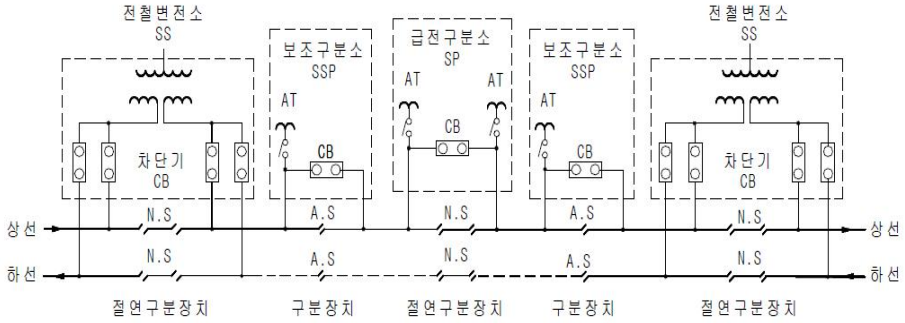


그림 3. 단권변압기의 방면별 급전방식의 구성

그림 4는 단권변압기$_1$과 단권변압기$_2$인 2대의 단권변압기 중간지점에 운전 중인 전기차가 있을 때 전류분포를 나타낸 것이다. 그림에서 단권변압기의 전압은 각각 E_1=55[kV], E_2=27.5[kV]다. 전기차의 부하전류 I=100[A]라 가정하면, 55[kV]의 공급전류 I_1은 단권변압기$_1$의 변압비에 반비례하기 때문에 I_1 = 50[A]다. 또한 단권변압기$_1$과 단권변압기$_2$에 흡상되는 전류는 전기차에서 각 단권변압기까지의 거리와 반비례하기 때문에 각각 50[A]가 되어 단권변압기$_1$과 단권변압기$_2$가 전기차 소요전류의 절반씩 부담한다. 즉 흡상전류는 레일에 흐르는 부하전류의 절반으로 전차선에 단권변압기$_1$과 단권변압기$_2$는 각각 절반은 급전선에 나머지 절반은 흡상하여 흡상전류는 각각 25[A]의 흡상효과를 나타낸다.

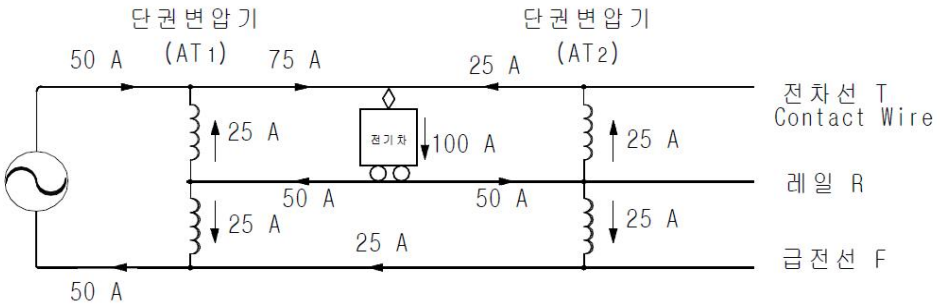


그림 4. 전기차 1대가 단권변압기$_1$과 단권변압기$_2$의 중앙 통과 시 전류분포

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 5는 전기차가 단권변압기$_1$ 및 단권변압기$_2$와 거리비가 3:1 일 때의 전류분포를 나타낸 것이다. 단권변압기의 손실이 없다고 하면 단권변압기$_1$의 흡상전류는 레일의 임피던스에 반비례하기 때문에 단권변압기$_1$흡상전류는 25[A]다. 절반의 전류인 25/2 = 12.5[A]가 전차선에 흐르고 나머지 절반의 전류 25/2=12.5[A]가 급전선에 흡상된다. 단권변압기$_2$는 같은 이유로 75/2=37.5[A]씩 흡상된다. 레일(R)에서 단권변압기$_1$으로 분류된 전류 $I_{단권변압기1}$ = (2/8) x 100= (1/4) x 100 = 25[A]가 흐르고 레일(R)에서 단권변압기$_2$로 분류된 전류 $I_{단권변압기2}$ = (6/8) x 100= (3/4) x 100 = 75[A]가 흐르게 된다.

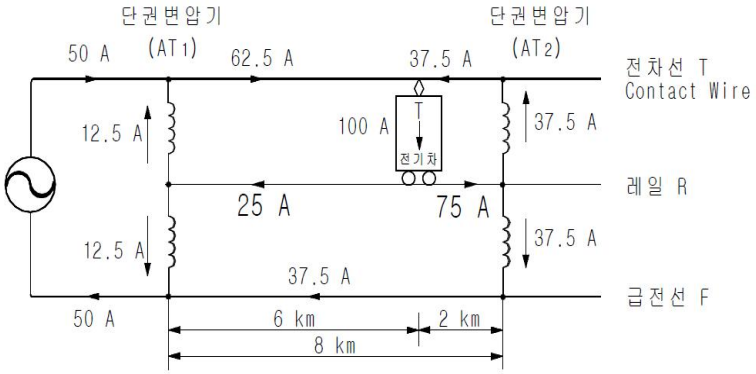


그림 5. 부하점이 편중되어 있을 때의 전류 분포

단권변압기와 전차선 접속점에 전기차 팬터그래프(pantograph)가 지나는 순간에는 단상변압기에 최대부하가 걸리게 되며 단권변압기$_1$과 단권변압기$_2$의 부하전류 분담은 각각 그림 6에서와 같이 흐르며 선로전류는 삼각파로 나타난다. 전철부하는 연속부하가 아니라 이동부하이기 때문에 단권변압기의 부하율은 대단히 낮으며 전철에서 단권변압기용량은 단권변압기의 과부하내량을 기준으로 간헐부하용량으로 계산된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

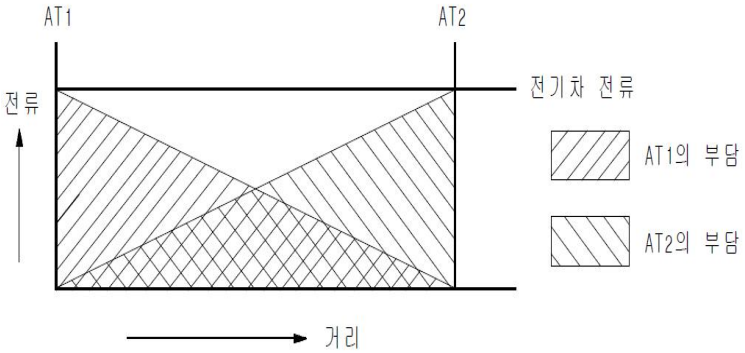


그림 6. 단권변압기 2대의 부하전류의 부담

3대의 단권변압기사이에 2대의 전기차가 각각 위치할 때 전류분포는 그림 7에 나타내었다. 이때의 전류분포는 전기차가 각 구간에 1대씩 있을 때 전류분포를 구해 각 선로에 흐르는 전류를 합산하면 얻을 수 있다. 예를 들면 그림 7의 회로 a에 흐르는 전류는 그림 8의 T_1에 공급되는 전류 75[A]와 그림 9의 T_2에 공급되는 전류 50[A]를 합산해 125[A] 임을 알 수 있다. 전원에서 공급되는 전류 I_1은 회로 a의 125[A]에서 T_1으로부터 단권변압기$_1$에 흡상되는 전류 25[A]를 뺀 100[A]가 된다. 이러한 방법으로 그림 7의 회로 e는 그림 8에서와 같이 T_1으로부터 단권변압기$_2$에 흡상되는 전류 25[A]와 그림 9의 T_2로부터 단권변압기$_2$에 흡상되는 전류 20[A], T_2로부터 단권변압기$_3$에 흡상되는 30[A]의 전류가 합산한 회로이기 때문에 이들 전류의 합은 75[A]이고, 귀환전류 I_2는 이 전류에 T_1으로부터 단권변압기$_1$에 흡상되는 전류 25[A]를 합산한 100[A]가 된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

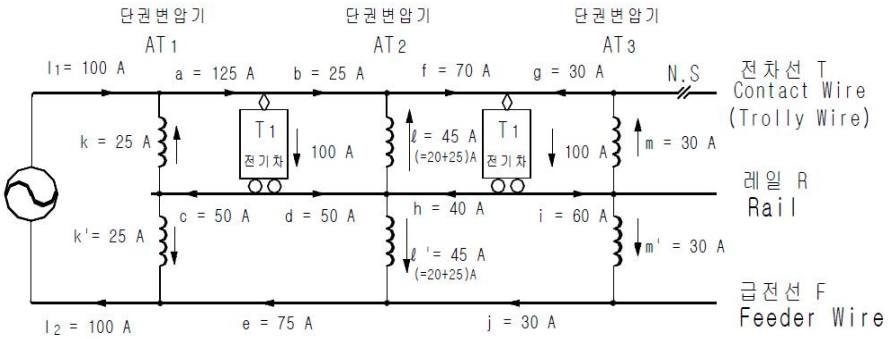


그림 7. 단권변압기$_1$, 단권변압기$_2$ 사이에 전기차가 2대 있을시 전류분포

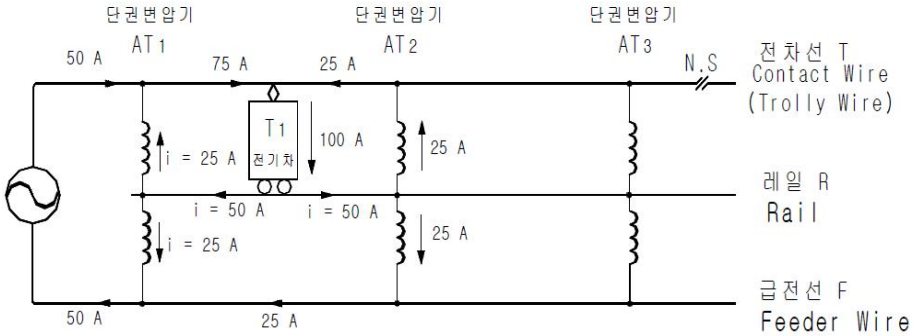


그림 8. 전기차가 단권변압기$_1$과 단권변압기$_2$ 사이에 있을시 전류분포

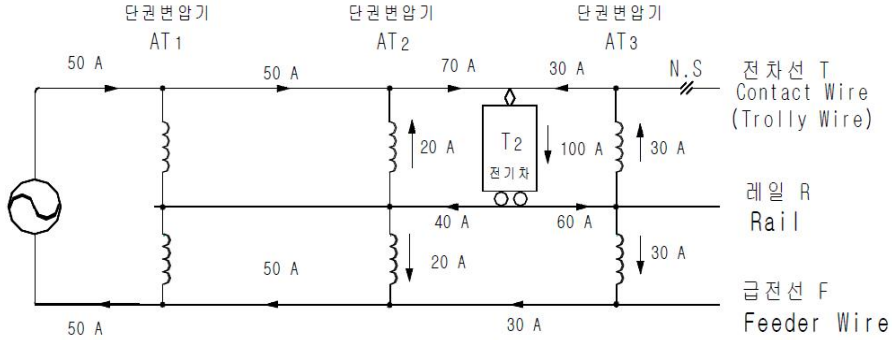


그림 9. 전기차 T$_2$가 단권변압기$_2$와 단권변압기$_3$ 사이에 있을시 전류분포

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. 단권변압기의 절연강도 및 단락강도

단권변압기 절연강도는 IEC 62505-1(2009-03)와 IEC62497-1(2010-02)의 규격에 맞춰 전기철도 지상설비의 절연강도를 변경해 단권변압기의 충격내전압은 기존 뇌충격지속레벨(LIWL) 200[kV]가 그대로 유지되었으나 대지 간 상용주파내전압을 70[kV]에서 95[kV]로 높이면서 절연강도를 IEC/UIC 기준에 맞췄다.

일반적으로 회로에 단락전류가 발생하면 회로구성 기기에는 과도한 전류에 의한 열적인 영향이나 전자반발력으로 인한 기계적인 충격을 받는다. 단락강도는 단락 시 선로에 접속된 기기의 도체온도상승이나 전자력으로 인한 손상 등 열·기계적인 이상을 일으키지 않는 것을 나타낸 것이다. 단락사고 발생 시 차단기나 퓨즈 등 보호시스템에서 차단완료까지의 회로에 접속된 개폐기, 모선, 케이블, 변압기에는 단락전류에 대해 열·기계적으로 견뎌야 한다. 이런 열적·기계적인 강도를 단락강도나 단시간내량이라 부른다. 열적강도는 회로에 흐르는 전류에 의해 기기내부에 발생된 열량을 말하는데, 기기의 도체저항 R과 전류 I 및 전류의 지속시간 t에 의해 다음 (5)와 같이 계산한다.

$$Q = I^2 \times R \times t \tag{5}$$

여기서 Q : 발생열량 [J]
I : 전류 [A]
R : 도체저항 [Q]
t : 지속시간 [s]

(5)에 따라 도체에 발생하는 열량은 I^2t에 비례하는 것을 알 수 있다. 단락전류로 인해 과도한 전류가 단시간에 흐르는 경우 발생열량은 주위에 열을 방사하지 않고 도체 온도상승이 발생하므로 주위 절연물의 파손이나 열응력에 의한 파괴 등이 발생하게 된다. 따라서 부하전류에 대한 열적강도만이 아

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

니라 단락 시 온도상승에 대한 열적강도를 확보해야 한다. 단락전류에 의한 전자력은 전류의 첫 파고값(i)의 2승에 비례하며 도체간 중심거리에 반비례하기 때문에 이러한 전자력에 기인하는 기계적응력에 견딜 수 있는 정도를 기계적강도라 한다. 기계적강도는 단락순시의 직류분의 영향을 많이 받기 때문에 최대전자력은 대칭단락전류와 비대칭계수를 곱한 파고값으로 규정할 수 있다. 전자기계력은 2개 도체에 전류가 흐를 때 전류의 상호작용에 의해서 각각 도체에 전자력이 발생한다. 전류가 같은 방향으로 흐르면 흡인력이 발생하고 반대방향으로 흐르면 반발력이 발생한다. 전자력은 다음 (6)과 같다.

$$F = \frac{2.04 \times 10^{-7} \times i_A \times i_B}{d} = \frac{2.04 \times 10^{-7} \times i^2}{d} \, [N/m] \qquad (6)$$

여기서, iA, iB : 전류 파고값 (iA = iB = i) [A]
d : 도체의 중심간격 [m]

단락강도를 검토하기 위해 단락용량이 큰 계통에 접속된 기기를 선정 시 구해진 계통의 단락전류 값에 대해 기기의 열적·기계적 강도에서 단락강도가 충분한가를 검토해야 하며, 수·변전기기에서의 열적·기계적강도의 관련규격은 다음 표 2에 나타내었다. 전철변전소의 주변압기 용량증가나 전원계통에서의 단락용량 증가에 따른 전차선로의 단락전류 증가를 대비하기 위해 단권변압기단락강도를 정격전류의 25배에서 35배로 하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 2. 수·변전기기의 열적·기계적강도

기기 종류	열적강도 교류대칭분 실효값	기계적강도 파고값	관련규격
차단기	정격차단전류에서 1초	60[Hz] 전력계통 일때 정격차단전류 x 2.6	IEC62271-100
전자 접촉기	개폐전류 = 정격전류 x10	-	IEC60947-4-1
단로기	2초간 견딜 수 있는 최대전류	60[Hz] 전력계통 일때 열적강도 x 2.6	IEC62271-102
변압기	변압기 2차 단락전류에 대하여 2초. 단, 최고 25배, 초과하는 경우는 협의에 의함.	변압기 2차 단락전류 x 비대칭 계수	IEC60076-5
변류기	정격단시간열전류: 1초간 견딜 수 있는 1차 전류의 최대치의 실효값	정격동작전류: 기계적 손상 없는 1차 전류 피크값, 정격열전류의 2.5배이상	IEC60044-1
영상 변류기	IEC의 특별한 규정 없음	-	IEC60044-1
배전반	정격단시간전류 x 2초	차단기와 일치한다.	IEC62271-200

국내 철도규정상 단권변압기표준용량에 따른 단락강도가 25배인 경우와 35배의 경우를 비교해보면 표 3과 같이 나타난다. 또한 전원 변압기인 Scott결선 변압기의 표준용량은 표 4와 같다.

표 3. 단권변압기의 정격용량과 단락전류

단권변압기의 정격전압[kV]		단권변압기의 규격			
1차	2차	자기용량	2차 정격전류 I_{2n}	단락전류	
				I_{2n} x 25	I_{2n} x 35
55 [kV]	27.5 [kV]	3,000[kVA]	109.1[A]	2,727[A]	3,818[A]
		5,000[kVA]	181.8[A]	4,545[A]	6,363[A]
		7,500[kVA]	272.7[A]	6,817[A]	9,454[A]
		10,000[kVA]	363.6[A]	9,090[A]	12,726[A]
		15,000[kVA]	545.5[A]	13,636[A]	19,090[A]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

단권변압기의 자기용량 3,000[kVA], 공칭전압 27.5[kV]인 경우 정격전류는 I_{2n}=3000/27.5=109.1[A]이고, 25배의 단락전류 I_{s25}=단권변압기 2차는 정격전류x단락강도 배수=109.1x25배=2,727[A]가 되며, 35배의 단락전류 I_{s35}=단권변압기(단권변압기)는 2차 정격전류x단락강도 배수=109.1x35배=3,818[A]가 된다.

표 4. 국내 Scott결선 변압기의 표준용량

변압기 종별	표준용량	최대출력	순시최대전력
스코트결선 변압기	10, 20, 30, 45, 60, 90[MVA]	100% : 연속 150% : 2시간	한쪽 상에 대해 300%, 2분
단권변압기	3, 5, 7.5, 10, 15[MVA]	100% : 연속 150% : 2시간	한쪽 상에 대해 300%, 2분

국내의 전원변압기로서 단일변압기인 경우 90[MVA]가 최대용량이며 운전용량은 60[MVA] 2대 병렬운전인 120[MVA]다. 국내에 설치된 Scott결선 주변압기의 최대용량이 90[MVA]라 하면 최악의 경우로 전원임피던스 Z_0 = 0[%]라고 가정하는 경우이며, 변압기 임피던스 Z_T=10[%]라 할 때 55[kV]모선의 최대단락전류는 8,181[A]다. 최악의 경우 전원측 단락용량이 무한이고 규격상 Scott결선 주변압기의 자기용량 기준 퍼센트임피던스(%)를 Z_T=10[%]라고 가정하면 Scott결선 주변압기 용량이 45[MVA]인 경우에 55[kV] 모선의 계산된 최대 단락전류는 4,091[A]다. 또한 60[MVA]인 경우는 5,455[A]가 된다. 60[MVA]x2대 병렬운전인 경우에는 10,909[A]가 된다. 반면 단권변압기의 정격용량이 5,000[kVA]인 경우에는 표 3에서 나타난 바와 같이 25배 단락강도는 4,545[A] 35인 경우는 6,363[A]다. 7,500[kVA]의 경우 25배의 단락강도는 6,817[A]이며, 35배인 경우 9,544[A]다. 단권변압기의 정격용량이 10,000[kVA]인 경우 25배 단락강도는 9,090[A]로 7,500[kVA]의 35배 시의 9,544[A]와 비슷하다. 가장 큰 단권변압기 단권변압기용량인 15,000[kVA]의 25배 단락강도는 13,636[A]이며. 이들을 비교하면 표 5와 같다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 5. 주변압기 2차 최대단락전류와 단권변압기의 단락강도 비교

Scott결선 주변압기 용량	55 [kV] 모선 최대단락 전류 [A]	단권변압기 용량	단락강도 [A]		단권변압기 최소용량 [kVA]
			25배	35배	
30[MVA]	2727[A]	3000[A]	2727[A]	3818[A]	3000[kVA]
		5000[A]	4545[A]	6363[A]	
45[MVA]	4091[A]	5000[A]	4545[A]	6363[A]	5000[kVA]
		7500[A]	6817[A]	9544[A]	
60[MVA]	5455[A]	7500[A]	6817[A]	9544[A]	7500[kVA]
		10000[A]	9090[A]	12726[A]	
90[MVA]	8182[A]	10000[A]	9090[A]	12726[A]	10000[kVA]
		15000[A]	13636[A]	19090[A]	
120[MVA]	10909[A]	10000[A]	9090[A]	12726[A]	-
		15000[A]	12726[A]	19090[A]	

표 5는 Scott결선 주변압기의 2차 55[kV]모선 최대단락전류와 단권변압기의 25배 단락강도와 35배 단락강도를 비교한 것으로 이러한 계산은 변전소 모선과 수전선로의 임피던스를 모두 0인 경우로 가상한 것으로 실제는 이 전류보다 적을 것으로 예상된다. 예를 들어 Scott결선 변압기 30[MVA]의 최대 단락전류는 2,727[A]로 부하단에 설치한 단권변압기용량 3,000[kVA]의 단락강도는 25배에서 2,727[A]다. 따라서 전차선로가 단락된 경우에도 계통운영상 지장 없을 것으로 사료된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

C. 분리급전과 병렬급전

단권변압기 급전계통에서 일반전철은 분리급전을 채택하여 사용 중이며 고속전철은 병렬급전을 사용하기 때문에 급전방식이나 급전구분소 구성이 다르다. 분리급전방식은 급전구간 내 8 ~ 10[km]마다 보조급전구분소(SSP)를 설치하고 상·하선 분리급전이 목적으로 선로별 전차선에는 단권변압기와 AS(air section)를 설치하고 정상운전을 위해 AS를 단락하는 차단기가 구비되어 있다. 급전구간 말단에 설치된 급전구분소(SP)는 그림 10과 같이 상·하선을 타이결선으로 병렬연결하고 단권변압기x4대를 설치하고 있으며 차단기는 상·하선 타이용 차단기와 연장급전용 차단기를 상선이나 하선별로 각 2대씩 4대를 설치하고 있다. 고속전철은 병렬급전방식으로 운영되며 급전구간 내 8 ~ 10[km]마다 병렬급전소(PP)가 설치되어 있으며 PP에는 상·하선 선로를 병렬로 연결하는 병렬선과 상·하선 전차선로에 공통으로 전력공급을 할 수 있는 단권변압기 2대와 단권변압기를 상·하선 선로에서 분리가능한 차단기 2대를 구비하고 있다. 병렬급전구간 말단에는 급전구분소(SP)를 두고 단상변압기 1대로 상·하선에 공동으로 전력이 공급되고 있으며 급전구분소(SP)에는 그림 11과 같이 급전 구간별 2대의 단상변압기와 병렬결선용 차단기 2대, 그리고 연장급전용 차단기 1대로 총 5대의 차단기가 있다.

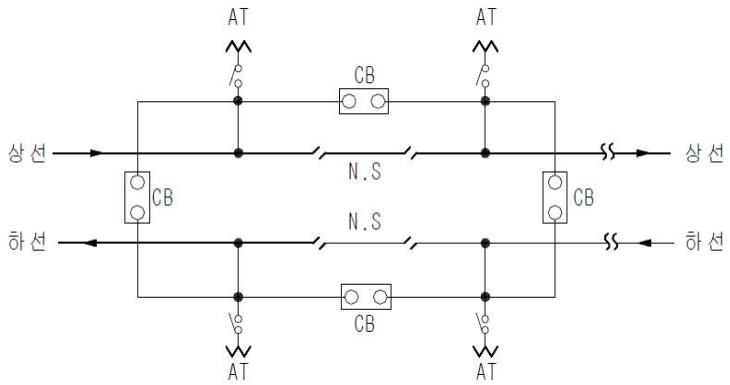


그림 10. 일반철도 분리급전계통의 급전구분소(SP) 결선도

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

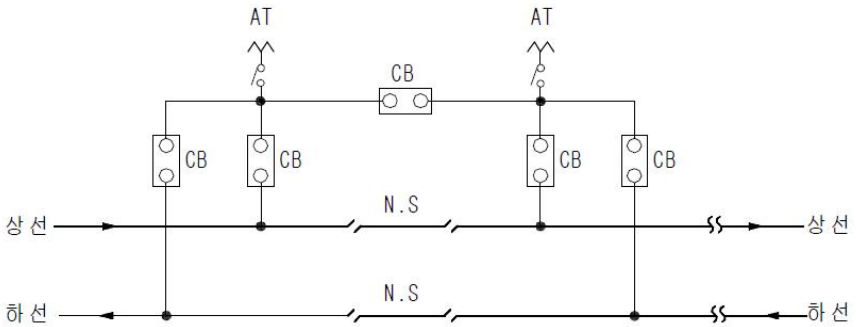


그림 11. 고속철도 병렬급전계통의 급전구분소(SP) 결선도

1. 분리급전

국내에 적용된 전기철도 급전방식은 크게 2종류가 있고 고속철도방식에서는 프랑스에서 도입한 병렬 급전방식을 채택하고 있으며, 일반철도는 일본의 영향을 받아 상·하선 선로를 각각 급전하는 분리급전(SP)방식으로 채택하고 있다. 분리급전은 그림 12와 같이 8 ~ 10[km]마다 전차선에 보조급전구분소가 있으며 보조급전구분소에는 air section(AS)을 설치하여 정상운전 시에는 차단기로 AS을 단락하고 운전하며 전차선 고장의 경우 차단기를 개방해 정전시킴으로서 AS를 통해 고장구간을 제거하고 건전구간의 운전이 지속될 수 있는 급전방식으로 유연성이 우수한 급전계통이다.

국내 분리급전은 급전구분소에 상·하선을 병렬로 연결해놓은 타이결선이 있는 것이 특징이다. 이 연결선은 상·하선 전차선의 전압강하 평준화와 건널선이 있으므로 전기차의 운행선로가 변경되는 경우 팬터그래프에 발생하는 아크를 방지하며 운전 시 회생제동효율을 높이는 역할을 하므로 유용한 급전방식이며 그림 12는 현재 우리나라 일반철도의 분리급전계통도이고 그림 13은 분리 급전계통에서 고장전류의 분포도이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

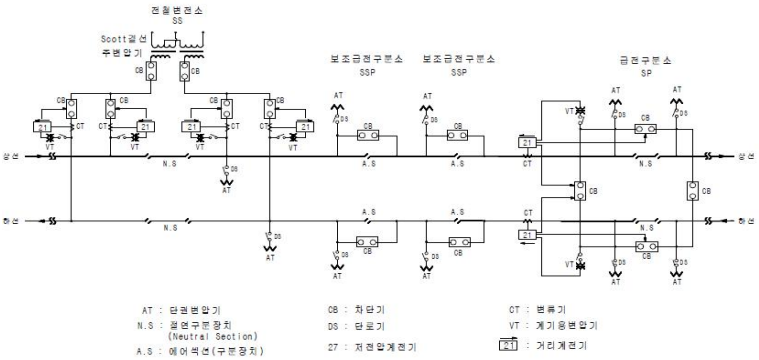


그림 12. 일반철도의 분리급전 계통도

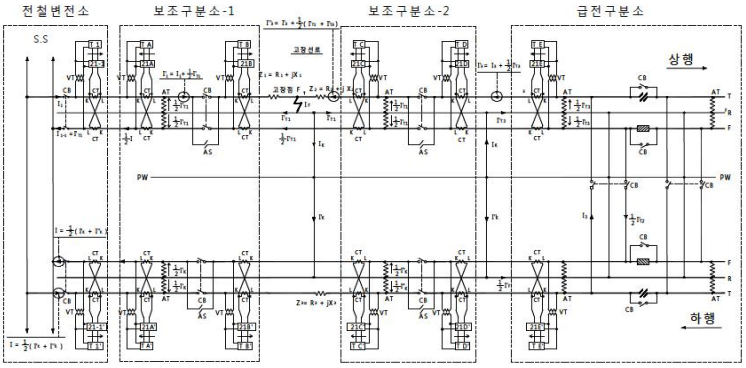


그림 13. 일반철도의 분리급전계통에서의 고장전류 분포

2. 병렬급전

병렬급전계통은 분리급전계통과 거의 비슷한 간격으로 병렬급전소를 설치하고 상·하선을 병렬선으로 접속한다. 병렬급전소의 경우에 병렬선에 2대의 단상변압기, 상·하선 측 연결선은 상선과 단상변압기 사이 그리고 하선과 단상변압기 사이를 분리할 수 있는 차단기 2대, 계기용변압기(VT) 2대와 저전압계전기 2대를 구비하고 있다. 단권변압기의 용량이 충분하다면 1대를 예비로 두고 가장 고장빈도가 많은 단권변압기 고장 시 즉각 예비 단권변압기를 투입함으로서 대응할 수 있는 것이 큰 장점이다. 병렬급전은 단권변압기운영

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

의 유연성뿐만 아니라 분리급전에 비해 상·하선이 병렬로 연결되 있기 때문에 전압강하가 대단히 적고 비교적으로 안정된 전차선 전압이 유지된다는 점과 회생제동 효율이 높다는 점이다. 또한 건널선이 있어 전차선 고장 시에 열차가 상·하선과 관계없이 교차운전이 가능한 점도 병렬급전의 장점이다. 그러나 최근의 보호시스템은 전차선 또는 단권변압기 고장 시 고장구간을 제거하고 건전구간의 운전을 지속할 수 있는 보호시스템의 부재로 급전구간 전체가 정전되는 것이 단점이라 할 수 있다. 그림 14는 병렬급전계통도를 나타낸 그림이고, 그림 15는 병렬급전계통의 고장 시 전류 분포도를 나타낸 것이다.

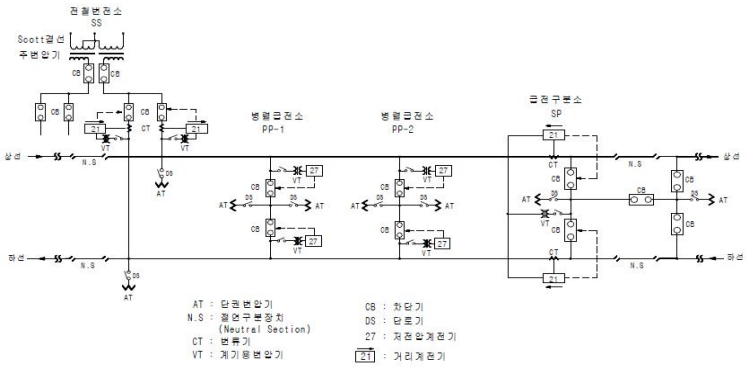


그림 14. 병렬급전 계통도

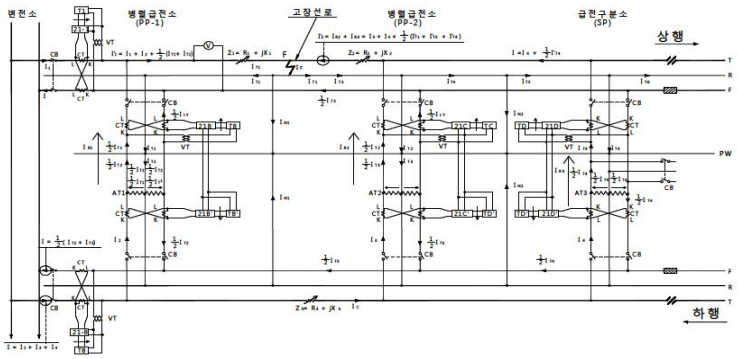


그림 15. 병렬급전계통의 고장 시 전류분포도

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ⅲ. 단권변압기의 단락강도 및 시험방법

전기철도에서 사용되고 있는 단권변압기의 단락강도에 대한 시험을 인증하기 위해 KERI의 자문결과 그동안 철도용단권변압기는 현재까지 단락강도 검증을 진행한 사례가 없는 것으로 조사되었다. 따라서 단권변압기에 대한 신뢰성이나 성능을 입증하기 위한 제도적인 개선이 필요할 것으로 사료된다. 신뢰성 입증이 되지 않은 단권변압기가 실제 계통에 운영 시 유효한 수명에 도달하기도 전에 단락강도 부족으로 인한 고장발생으로 열차운행이 중단되는 등의 영향을 줄 우려가 있기 때문에 이러한 상황을 해결하기 위하여 국외의 단권변압기 단락강도 규격을 조사하고 국내 단권변압기 제작기술 신뢰성 입증과 단권변압기 규격에 적용할 수 있는 적정 단락강도와 시험방법을 도출해 단권변압기의 단락강도 성능이 향상된 제품을 제작하고 설치함으로써 유지 및 보수 등의 예산절감 뿐 아니라 안전성, 신뢰성, 경제성을 향상 시킬 수 있을 것으로 판단된다.

A. 단권변압기 요구사항

단권변압기는 정격용량 150[%]의 부하에 2시간 동안 또는 300[%]의 부하에 2분 동안 연속으로 사용해도 이상이 발생되지 않아야 한다는 규정이 있으며 일본 철도의 규격도 국내의 교류전기철도 시설지침과 거의 동일하다. 프랑스 철도에 대해 조사한 결과 과부하내량을 국내 규격보다 낮게 책정하고 있으며 단권변압기 과부하내량은 20[%] 과부하에 2시간, 50[%] 과부하에 15분, 100[%] 과부하에 대하여 5분으로 정해져 있다. 그림 16은 프랑스의 단권변압기 명판을 참고해 %임피던스를 단락임피던스(Ω)로 환산한 것이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

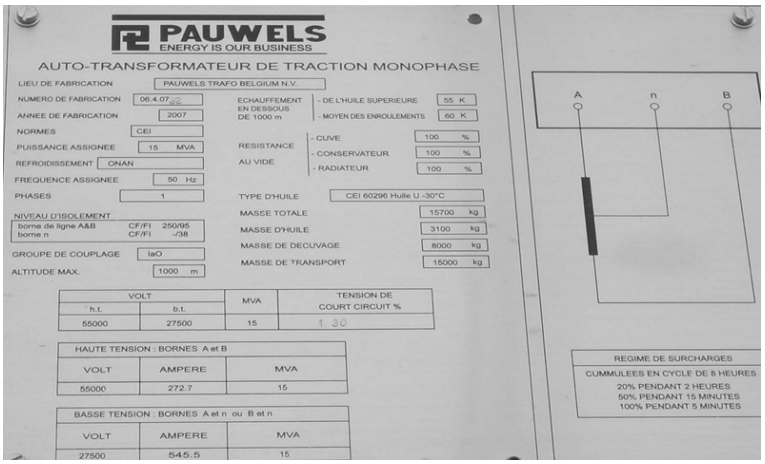


그림 16. 프랑스 PAUWELS 단권변압기

단권변압기 명판에 기재된 내용을 살펴보면 단권변압기의 선로용량 15[MVA]이며 고압측 전압은 55[kV], 고압측 전류는 272.7[A]로 나타나있다. 또한 저압측 전압은 27.5[kV], 저압측의 전류는 545.5[A]이며 뇌충격지속전압은 250[kV]이다. 상용주파내전압은 95[kV], %임피던스 1.3[%]인 경우 옴 값으로 환산 시에는 자기용량을 P, 선로용량 2P = 15,000[kVA]이므로 아래 수식처럼 되어 우리나라 규격인 0.1 + j0.45 보다는 다소 큰 값임을 알 수 있다.

$$\%Z = \frac{2P \times Z_{\Omega}}{10 \times (kV)^2} \tag{7}$$

$$Z_{\Omega} = \frac{10 \times (kV)^2 \times \%Z}{2P} = \frac{10 \times (27.5)^2 \times 1.3}{15000} = 0.6554\,[\Omega] \tag{8}$$

B. 단락강도

단락강도시험 KS C IEC 60076-5(2008) 4.1.3 대칭단락전류의 지속시간에 의하면 단권변압기의 단락전류가 정격전류의 25배를 초과하는 변압기에 대하여 제작자와 구매자가 합의해 2초미만의 단락전류 지속시간을 적용할 수 있다고 정해져 있다. 한전표준기준 인 ES-6120-001에서는 변압기의 외부회로

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

단락고장 시에 발생되는 단락전류가 소정시간 동안 흘러도 열적·기계적 손상 없이 견딜 수 있도록 설계·제작되어야 하고 외부회로 단락고장 지속시간은 2초로해야 한다고 정해져 있다.

C. 단권변압기의 단락강도 및 시험방법

표 6은 Scott결선 주변압기의 용량에 따른 2차권선 55[kV]모선의 최대단락전류, 단권변압기 정격전류 25배 및 35배의 단락전류를 비교한 표이다.

표 6. 주변압기 2차 최대단락전류와 단권변압기의 단락강도

스코트결선 변압기 용량	55 [kV] 모선 최대 단락전류	단권변압 기용량 [kVA]	단락강도	
30[MVA]	2727[A]	3,000	25배	2,727[A]
			35배	3,818[A]
		5,000	25배	4,545[A]
			35배	6,363[A]
45[MVA]	4091[A]	5,000	25배	4,545[A]
			35배	6,363[A]
		7,500	25배	6,817[A]
			35배	9,544[A]
60[MVA]	5455[A]	7,500	25배	6,818[A]
			35배	9,544[A]
		10,000	25배	9,090[A]
			35배	12,726[A]
90[MVA]	8182[A]	10,000	25배	9,090[A]
			35배	12,726[A]
		15,000	25배	13,636[A]
			35배	19,090[A]
120[MVA]	10909[A]	10,000	25배	9,090[A]
			35배	12,726[A]
		15,000	25배	13,636[A]
			35배	19,090[A]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

예를 들어 전원측 임피던스를 0이라 가정하면, Scott결선 주변압기 30[MVA]의 최대 단락전류는 2,727[A]로 부하단에 설치한 단권변압기 3,000[kVA] 용량의 단락강도 25배에서 2,727[A]로 그 값이 같다. 하지만 전원이나 수전선로 등의 선로정수를 적용하면 급전계통운영에 별다른 지장이 없을 것으로 판단된다. 또한 고속철도 주변압기 90[MVA] 2차 측 모선 최대단락전류 8,182[A]에 대하여 단권변압기 10,000[kVA] 2차측 정격전류 25배의 전류 9,090[A]로서 단락강도가 충분한 것으로 조사되었다.

KS C IEC 60076-5(2008)에 따르면 단락전류에 대한 열적강도에서 권선평균온도의 최대 허용값은 KS C IEC 60076-5의 4.1.4에 의하고 Θ_1의 계산은 KS C IEC 60076-5의 4.1.5에 따르며 변압기 종류별 단락 후 권선평균온도의 허용 값은 표 7에 나타내었다.

표 7. 단락 후 권선평균온도의 최대 허용 값

변압기종류	절연온도 [℃]	최대온도 [℃]	
		구리	알루미늄
유입	105(A)	250[℃]	200[℃]
건식	105(A)	180[℃]	180[℃]
	120(E)	250[℃]	200[℃]
	130(B)	350[℃]	200[℃]
	155(F)	350[℃]	200[℃]
	180(H)	350[℃]	200[℃]
	200	350[℃]	200[℃]
	220	350[℃]	200[℃]

구리와 알루미늄 권선에 단락이 발생 후 권선에 발생하는 평균온도 Θ_1의 계산법은 다음 (9), (10)과 같다.

$$\text{구리}(Cu) \Rightarrow \theta_1 = \theta_0 + \frac{2 \times (\theta_0 + 235)}{\frac{106000}{J^2 \times 1} - 1} \tag{9}$$

$$\text{알루미늄}(Al) \Rightarrow \theta_1 = \theta_0 + \frac{2 \times (\theta_0 + 235)}{\frac{45700}{J^2 \times 1} - 1} \tag{10}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

여기서, Θ_0 : 초기권선온도로서 섭씨 0℃로 표기, J : 대칭적인 단락전류 실효값, 단락전류 밀도 A/mm^2, t : 지속시간 s, Θ_1 : 권선에 발생하는 평균온도이다.

IEEE Std C57.12.00-2000에서 단락전류에 대한 열적강도 값은 다음 표 8과 같다. JEC 2200(1995)에 따른 단락전류에 대한 열적강도 값은 다음 표 9와 같다.

표 8. IEEE Std C57.12.00-2000에서 단락전류에 대한 열적강도 값

구분	절연 종류	권선온도의 한계 [℃]	
		구리	알루미늄
최고허용온도	유입 A종	250	200, 250

표 9. JEC 2200(1995)에서 단락전류에 대한 열적강도 값

구분	절연의종류	권선온도의 한계 [℃]	
		구리	알루미늄
최고허용온도	건식 A종	180[℃]	180[℃]
	건식 E종	250[℃]	200[℃]
	건식 B종	350[℃]	200[℃]
	건식 F, H종	350[℃]	-
	유입 A종	250[℃]	200[℃]

변압기는 규정하는 단락전류가 일정한 시간이 흘러도 각 탭에 있어 기계적으로나 열적으로 손상하지 않아야 한다고 정의하고 있으며, 단락전류에 대한 기계적강도를 고려하는 경우 과도전류를 포함한 최대순시치를 이용한다. 또한 권선의 온도상승을 고려하는 경우에 단락전류의 교류분 실효치를 사용하며 500[kVA] 이하인 경우에는 정격전류의 25배, 그 이상의 용량에 대해서는 협의하도록 규정되어 있다.

변압기의 부하측 회로에서 단락사고 발생 시 단락전류를 제한하는 것은 회로 및 변압기의 임피던스뿐이기 때문에 보통 정격전류 수배~수십배의 큰 전류가 흐르게 된다. 이러한 단락전류에 의해 변압기권선에는 전자기계력이 작

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

용하게 되고 어떤 경우는 권선이 파괴될 때도 있다. 단락전류가 장시간 지속되면 권선온도가 심하게 상승해 절연물을 손상시키기 때문에 전자기계력에 대한 도체의 항장력을 약화시켜 결국은 소손에 이른다. 즉, 외부단락은 이상전압과 함께 변압기고장의 원인이 되고 변압기 규격에서 정한 조건의 단락에 대하여 기계적·열적으로 단락에 견디도록 설계하고 제작해야할 뿐 아니라 변압기의 사용에 있어 규격범위를 넘은 외부단락을 하지 않도록 주의해야 한다. 또한 만일의 사고가 발생하더라도 규정에 정한 시간 내 회로가 차단될 수 있도록 보호기기의 협조가 필요하다. 외부회로 단락으로 인한 단락전류가 소정시간 동안 흘러도 열적·기계적 손상 없이 견딜 수 있는가를 확인하기 위해 시험하는 것으로 전력용이나 배전용 유입변압기에 대하여 적용한다. 다만 외부회로의 단락은 3상 단락, 선로간의 단락, 1선 지락 및 2선 지락 등을 의미한다.

단락회로 시험절차를 위해 변압기는 운전준비중인 새로운 변압기로 시험을 진행한다. 단락회로시험 중에는 특성에 영향이 없는 부속물들은 설치할 필요가 없으며, 사후단락은 변압기의 또 다른 권선에 전압을 인가한 후에 단락하고 사전단락은 전압을 인가하기 전 단락시킨다. 단상변압기의 단락시험 지속시간과 시험횟수는 각각 0.25[sec], 3회이며 3상 변압기는 각각 0.5[sec], 9회로 단권변압기는 단상변압기의 기준을 적용한다. 대칭단락회로 전류값 계산은 2개의 분리된 권선을 가진 3상 변압기에 대하여 두개의 대칭적인 단락회로의 전류 I 실효값을 계산한다.

$$I = \frac{U}{\sqrt{3} \times (Z_t + Z_s)} \, [kV] \tag{11}$$

여기서, Zs : 시스템의 단락회로임피던스, Us : 시스템의 정격전압 [kV], S : 시스템의 단락회로 피상전력 [MVA]이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

기본탭에 대하여 U는 권선의 정격전압 Ur이며 단위는 [kV], Zt는 변압기의 단락회로 임피던스이다.

$$Z_t = \frac{z_t \times U_r^2}{100 \times S_r} \tag{12}$$

여기서, Zt : 정격전류, 정격주파수 상태에서 기본 탭에서 측정한 단락임피던스로서 백분율로 표시, Sr : 변압기의 정격출력으로서 단위는 [MVA], zt : 대상권선과 탭을 포함하고 있는 변압기 단락임피던스이다.

비대칭 시험전류의 최대값 'I는 아래와 같다.

$$'I = I \times k \times \sqrt{2} \tag{13}$$

여기서, I : 대칭단락전류, k : 시험전류의 설정 값을 고려한 것, $\sqrt{2}$: 정현파에서 최대값이 실효값의 $\sqrt{2}$배임을 고려한 것, X : 변압기 리액턴스와 시스템리액턴스와의 합(Xt+Xs)으로서 단위는 [a], R : 변압기 저항과 시스템저항의 합(Rt+Rs) [Q], Rt : 기준온도에서의 저항이다.

비대칭계수 선정 시 시스템의 단락임피던스를 단락전류 계산에 포함하여야 한다. 변압기의 임피던스는 대부분 리액턴스 성분이기 때문에 단락전류의 위상은 전압에 대해 90° 지연되고 전압이 0인 순간 단락 시에는 단락전류의 교류분에 직류분이 중첩된 형태가 된다. 직류분은 회로의 리액턴스와 저항의 비(X/R)에 의해 결정되고 회로의 저항 때문에 점차 감쇠해 수 사이클 이내 없어지나 최초의 파고값은 거의 교류분 파고값의 2.55 x Is인 큰 단락전류가 권선에 흐르면 전류값에 비례하여 누설자속이 생긴다. 누설자속이 권선도체를 끊게 되면 도체에 기계력이 작용하고 그 크기는 K = B x im x l [N]의 기계력 K가 된다. 자속밀도는 전류에 비례하기 때문에 전자기계력은 단락전류의 제곱에 비례하게 된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

비대칭 계수 = 비대칭 단락전류/대칭단락전류

$$\text{비대칭 단락전류} = \sqrt{\left(\frac{\text{단락전류 대칭성분}}{2}\right)^2 + (\text{단락전류 비대칭성분})^2}$$

고압회로에 사용되는 차단기는 차단시간이 수 사이클로 비교적 길어지므로 대칭단락전류만을 고려해도 되나 전력퓨즈나 저압회로에 사용하는 배선용차단기에서는 0.5사이클 정도의 단락전류에 곧바로 차단해야 하므로 비대칭단락전류를 계산하여 적용해야 한다. 단락회로시험전류의 비대칭 피크값과 대칭적인 실효값에 대한 공차는 단락회로 시험시간이 충분하다고 고려 했을때 첫 번째 피크 크기가 1인 비대칭전류가 실효값이 I인 대칭전류로 변하면서 시험에서 얻어진 전류 피크값은 규정된 값의 5[%]를 초과해 벗어나면 안되며 대칭전류는 규정된 값의 10[%]를 초과하면 안 된다. 단권변압기의 단락회로 시험 절차는 시험방법, 전류값, 순서, 시험횟수는 협의에 따른다. 변압기가 단락회로시험을 통과하기 위하여 시험시간동안 행해진 단락회로시험의 결과, 측정, 체크사항은 어떤 고장조건도 나타나지 않아야한다. 또한 적용 가능한 유전체 시험과 다른 시험은 성공적으로 반복되었으며 뇌임펄스시험이 명시되어 있다면 이것 또한 이행되어야 한다. 탱크외관 검사에서 변위, 성층의 이동, 권선결선이나 지지구조의 변형 같은 결함 또한 없어야 하며, 내부적인 전기적 방전흔적이 없어야 한다. 시험이 끝날 시점에 각각의 위상에 대하여 옴(Ω) 값으로 표기된 단락회로리액턴스 값은 제시된 값 이상으로서 초기 값과 다르지 않다.

전기철도 같은 2상 전력계통의 단락전류나 전력계통 임피던스 영향은 IEC의 계산식(IEC 단락강도시험방법 KS C IEC 60076-5 : 2008)을 3상을 대상으로한 내용이나 철도의 55[kV]계통은 단상이기 때문에 IEC의 계산식을 단상에 적용하도록 변형하여야 하므로 IEC 수식의 정확한 이해가 필요하다. 국내의 Scott결선 변압기 퍼센트임피던스(%)는 모두 10[%]이며, U_r은 사용Tap에

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

서 정격전압으로 55[kV]다. Sr은 변압기의 정격출력으로 90[MVA]인 Scott결선변압기인 경우에 단상 45[MVA]x2로 구성되어 있다. 한전과 수전선로의 임피던스는 100[MVA] 기준 용량으로 계산된 %임피던스이고 변압기 임피던스는 자기용량 기준 %임피던스이기 때문에 단락전류를 계산할 때에는 퍼센트 임피던스(%)법으로 하는 것이 편리하다.

Z_s는 계통임피던스로 전철변전소에서 보면 송전 Bus의 임피던스와 수전선로의 임피던스의 합으로 3상에서는 선로 중 선로 1개상과 중성 선로의 단락전류를 계산함으로써 이를 단상으로 환산하면 선로임피던스 값의 2배로 계산되어야하고 전압은 상전압으로 계산하여야 한다. 이와 같은 기준에 의하여 Scott결선변압기 2차의 55[kV]측 기준 정격전류 I_N은 (14)와 같다.

$$I_N = \frac{\text{기준용량}}{\text{기준전압}} = \frac{100 \times 10^3}{55} = 1818.1818\,[A] \tag{14}$$

단락전류 I는 모선의 임피던스와 수전선로의 임피던스를 포함한 경우 Scott결선변압기 2차 55[kV]단자에서 단락전류이며 단락전류 II는 한전모선을 무한대 모선으로 수전선로의 임피던스를 0으로 간주한 Scott결선변압기만의 단락전류이다. 단상변압기의 %임피던스를 z_t = 1.2[%]라 할 때 한전모선이 무한대의 모선이라 가정을 하면 단상변압기 2차 측의 단락전류는 정격전류의 83.33배이고 현재 국내의 철도 전력계통에서 임피던스의 영향은 대구 전철변전소의 21.5[%]가 최대이므로 이 경우도 단권변압기의 2차측 단락전류 I_T는 (15)와 같다.

$$I_T = 83.33 \times \frac{100 - 21.7}{100} = 65.4\text{배} \tag{15}$$

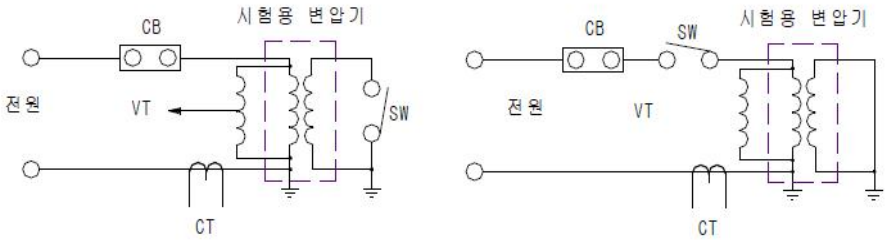
즉, 2차 정격전류의 65.4배가 됨으로써 전력계통 임피던스는 단권변압기의 단락강도에 대해 22[%] 정도로 감소하게 됨을 알 수 있다. 계통임피던스 Z_0

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

의 영향이 단락강도를 25배까지 낮추면 전력계통의 전압강하로 인해 운전이 불가능할 것으로 사료된다.

단락회로의 시험은 사후단락이나 사전단락에 의해 시험하며 사후단락은 변압기를 여자상태로 두고 단락고장을 발생시키는 개폐기(SW)를 단락하는 방법이고 사전단락은 단락 결선한 변압기의 여자측 단자에 전원을 개폐기(SW)로 투입하는 방식이다.



(a) 사후단락회로 (b) 사전단락회로

그림 17. JEC에 의한 단락강도 시험회로

단락시험의 지속시간 및 시험횟수는 변압기의 정격용량에 따라 분류 A, B, C에서 정한 규격으로 시행하며 변압기 정격용량의 분류는 아래와 같다.

분류 A : 3.150[MVA] 이하 (0.5[sec]이상, 3회 이상, 허용오차±10[%])
분류 B : 3.151[MVA]~40[MVA]
분류 C : 40[MVA] 초과

분류 B, 분류 C 변압기는 시험횟수, 지속시간, 탭 위치에 대하여 주문자와 제조자가 협의해 정하며 단락시간을 지정하지 않은 경우 2초로 한다. 그러나 단락전류가 탭 전류의 25배를 초과하는 경우 다음 (16)에 의해 단락시간을 결정한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$\text{단락시간 } t = 2 \times \left(\frac{\text{탭전류} \times 25}{\text{단락전류}} \right)^2 [\text{sec}] \qquad (16)$$

단락시험 전의 조건은 동의가 없는 경우 신품 변압기로 시험을 진행해야 하며, 시험에 영향을 받지 않는 부속품은 포함하지 않고 단락시험 전 수입시험을 하며 변압기에 탭이 있는 경우는 단락임피던스와 필요에 따라 저항을 각 단락시험 탭에서 측정한다. 또한 단락임피던스의 측정장치는 ±0.2[%]이내의 정밀도에서 재현성을 증명할 수 있어야 한다.

단락시험의 결과판정은 시험 중에 단자전압 및 단락전류의 파형에 급속한 변화가 있으면 안되며 단락임피던스 변화 허용치는 단락전류 통전 후 측정하여 각 상 단락임피던스는 시험 전 측정값에 따라 분류된다. 분류 A의 변압기에서는 일정 값 이상 변화하지 않아야 한다. 또한 분류 B, 분류 C의 변압기에 대해서는 제조자 및 사용자의 협의 하에 결정되며 재차 실행한 시험에 합격해야하며 접속선, 변위, 권선, 지지구조물의 변형, 방전흔적 등의 육안으로 점검한 결과로 변압기에 이상이 없어야 한다.

한국전력 표준규격에 의한 변압기 단락강도 시험규격은 다음 표 10과 같이 분류된 5[kVA]이상의 전력용 및 배전용 유입변압기 단락강도시험에 대해 적용하고 있다.

표 10. 변압기의 분류

분류	단상 [kVA]	3상 [kVA]
1	5 ~500	15 ~ 500
2	501 ~ 1,667	501 ~ 5,000
3	1,668 ~ 10,000	5,001 ~ 30,000
4	10,000 초과	30,000 초과

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

단락전류에 의한 권선의 온도상승 시험 시 결선은 변압기 여자 후 단락고장을 일으키는 단자를 단락하는 방법과 단락결선을 미리 해둔 변압기에 여자측 단자에 전원을 투입하는 방법이 선택가능하다. 단락시험 횟수는 대칭단락전류와 비대칭단락전류에 의해 시행하며 대칭단락전류는 4회, 비대칭단락전류 2회 실시한다. 단락시험은 0.25[sec]가 기본이며 6회 시험횟수 중 1회는 대칭단락전류에 의한 시험을 해야 한다. 비대칭단락전류는 비대칭계수를 표에서 적합한 값을 찾아 적용하며 제1파 비대칭 파고값 전류는 다음 (17)과 같이 계산한다.

$$I_{sc}(pl.asym) = k \times I_{sc} \tag{17}$$

여기서, Isc : 대칭단락전류, k : 비대칭계수는 X/R의 값에 따름, R : 변압기와 계통저항의 합 [Ω], X : 변압기와 계통리액턴스의 합 [Ω]이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ⅳ. 결론

철도수송의 수요증가로 인해 수·변전설비용량과 전원측 단락용량은 지속적으로 상승하는 추세다. 따라서 단권변압기 단락강도를 25배에서 35배로 변경하는 것은 그 필요성과 경제성도 중요하지만 국내교류전기철도 단상변압기 제조업체의 제작과 설계기술로 단락강도가 35배인 단권변압기가 제작이 가능한지도 중요하다. 교류전철 변전소의 단권변압기의 단락강도는 Scott결선 변압기의 M상 및 T상의 2차 측인 55[kV]모선이 최대단락전류를 견딜 수 있게 단권변압기 단락강도의 배수를 결정하는 것이 중요하다. 국내 급전계통을 분석한 결과 변전소 주변압기 용량 등을 고려해 현재와 같이 25배의 단락강도를 가진 단권변압기를 사용해도 무방할 것으로 판단된다. 그러나 전철변전소에 사용되는 단권변압기용량과 단락강도는 비례관계에 있어 소규격의 단권변압기의 적용을 위해서는 35배의 단락강도를 가진 단권변압기의 개발이 선행되어야 한다. 현재 국내 제조업체의 기술수준은 35배의 단락강도를 가진 단권변압기 개발이 매우 어렵다. 따라서 현재 운영 중인 KRS의 개정을 신중히 검토할 필요가 있으며 국내 제조업체의 품질확인과 성능보증을 위해 유예기간을 정한 후 25배의 단락강도에 대한 시험인증을 강제할 필요가 있다. 또한 단락시험시간은 0.25[sec], 허용오차는 ±10[%], 단락시험회수는 3회, 단락시험전류는 단권변압기 2차 정격전류의 25배를 적용한다. Scott결선 변압기의 용량과 조합 가능한 단락강도가 25배인 단권변압기는 Scott변압기 용량에 따라서 3[MVA]~15[MVA]까지 용량을 조합해 사용이 가능할 것으로 사료되며 이같은 조합방식은 단권변압기의 단락강도 35배 제작이 국내 기술만으로 가능할 것이라는 결론에 도달할 때까지 잠정적으로는 단락강도가 25배인 단권변압기의 사용이 바람직 할 것으로 보인다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

참고문헌

[1] R. J. Hill, " Electric traction and DC traction motor drives", Electric Railway Traction, pp 35～90, 1986

[2] J. Allan, C. A. Brebbia, "Railway System and Management", Comput단권변압기ion Mechanics Public단권변압기ions, pp393～495, 1996

[3] R. Kadhim, W. S. Chan, J. Allan, "Sub-St단권변압기ion Uncharacteristic Harmonics Study on a D.C. Supplied Railway using a Computer Based Model", COMPRAIL '92, pp.3～14, 1992

[4] J. Allan, C. A. Brebbia, "Railway technology and Environment", Comput단권변압기ion Mechanics Public단권변압기ions, pp139～187, 1996

[5] G. Digby, D. B. Hewings, "Simul단권변압기ion of Voltage Controoled Traction Rectifiers on a Medium Voltage AC Distribution System", COMPRAIL, pp.27～38, 1992

[6] A. Piccolo, "Subst단권변압기ion autom단권변압기ion and control in railway networks, Comput단권변압기ion Mechanics Public단권변압기ions, pp.127～138, 1996

[7] J. D. Glover, A. Kusko, S. M. Peeran, "Train Voltage Analysis for AC Railroad Electrific단권변압기ion", IEEE, IASS:ISA, pp207-216, 1982

[8] R. J. Hill, "On-Line Simul단권변압기ion of Voltage Regul단권변압기ion in Autotransformer-Fed AC Electric Railroad Traction Networks", IEEE Transactions on vehicular Technology, Vol.42, No.3, pp365～372, August, 1993.

[9] Mochinaga, Y., Hisamizu, Y., Takeda, M., Miyashita, T., Hasuike,

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

K., “St단권변압기ic power conditioner using GTO converters for AC electric railway”, Power Conversion Conference, pp.641-646, 1993

[10] Hirakawa M., Eguchi N., Yamamoto M., “Self-commut단권변압기ed SVC for electric railways”, Power Electronics and Drive Systems, Proceedins of 1995 Intern단권변압기ional Conference, pp.732～737, 1995.

[11] Kawahara K., Hase S.I., Mochinaga Y., “Compens단권변압기ion of voltage drop using st단권변압기ic VAr compens단권변압기or 단권변압기 sectioning post in AC electric railway system”, Power Conversion Conference - Nagaoka 1997, Proceedings of the 1997 v.2 , pp.955～960, 1997

[12] KAWAHARA Keiji, HISAMIZU Yasuji, HASE Shin-ichi, “Development of St단권변압기ic Var Compens단권변압기or for San-yo Shinkansen”, Quarterly reports v.41 no.4 , pp.148 - 153 , 2000

[13] Chu Wen-Shyan, Gu Jyh-Cherng, “A new hybrid SVC scheme with Scott transformer for balance improvement”, Rail Conference, 2006. Proceedings of the 2006 IEEE/ASME Joint 2006 , pp.217～224 , 2006

[14] Ma Jianzong, Wu Mingli, Yang Shaobing, “The applic단권변압기ion of SVC for the power quality control of electric railways”, Sustainable Power Gener단권변압기ion and Supply, 2009. SUPERGEN ‘09. Intern단권변압기ional Conference on 2009 Apr., pp.1～4 , 2009

[15] Chen Baichao, Kokernak J.M., “Thyristor controlled two-stage magnetic-valve reactor for dynamic VAr-compens단권변압기ion in electric railway power supply systems”, Applied Power Electronics

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Conference and Exposition, Fifteenth Annual IEEE 2000 Vol.2, pp.1066~1072, 2000

[16] Celli G., Pilo F., Tennakoon S.B, “Voltage regul단권변압기ion on 25 kV AC railway systems by using thyristor switched capacitor”, Harmonics and Quality of Power, 2000. Proceedings. Ninth Intern단권변압기ional Conference on 2000 Vol.2, pp.633~638, 2000.

Collection @ chosun