



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](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

간단한 구조의 새로운
교류 반도체 차단기



2017년 6월

부 경 대 학 교 대 학 원

전 기 공 학 과

송 승 민

공 학 석 사 학 위 논 문

간단한 구조의 새로운 교류 반도체 차단기

지도교수 김 인 동

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2017년 6월

부 경 대 학 교 대 학 원

전 기 공 학 과

송 승 민

송승민의 공학석사 학위논문을 인준함.

2017년 6월



주 심 공학박사 노 의 철 (인)

위 원 공학박사 박 창 현 (인)

위 원 공학박사 김 인 동 (인)

목 차

그림 목차	ii
표 목차	v
Abstract	vi
1. 서 론	1
2. 제안한 AC Solid-State Circuit Breaker	7
2-1. 제안한 AC Solid-State Circuit Breaker	7
2-2. 제안한 AC Solid-State Circuit Breaker의 설계	16
2-3. 시뮬레이션 및 실험 결과	30
3. 결 론	37
참 고 문 헌	38

그 립 목 차

그림 1-1. 2003~2012년 전기화재 건수	1
그림 1-2. 2012년 전기화재의 원인 분석	1
그림 1-3. 반도체 차단기를 통한 전력 공급	2
그림 1-4. 반도체 스위칭 소자 GCT, GTO, IGBT의 도통 손실	3
그림 1-5. 10 [kV] 정격 전력에서 GCT와 SCR의 도통손실	3
그림 1-6. 기존의 3상 SSCB에서 C_{21}, C_{22} 의 충전루프	4
그림 1-7. 그림 1-6에서 단락사고 발생시 C_{21}, C_{22} 의 충전 루프	4
그림 1-8. 기존의 3상 SSCB와 C_{21}, C_{22} 의 충전 루프	5
그림 1-9. 그림 1-8에서 지락사고 발생시 C_{21}, C_{22} 의 충전 루프	5
그림 2-1. 제안한 AC SSCB의 전류 커패시터 충전 방식	7
그림 2-2. 제안한 AC Solid-State Circuit Breaker(AC SSCB)	8
그림 2-3. 제안한 AC SSCB 동작 모드	9
그림 2-4. 제안한 AC SSCB 동작 파형	10
그림 2-5. 전류 커패시터 C_{11} 의 충전 루프	11
그림 2-6. 전류 커패시터 C_{21} 의 충전 루프	12
그림 2-7. 전류 커패시터 C_{32} 의 충전 루프	12
그림 2-8. 전류 커패시터 C_{22} 의 재충전 루프	14
그림 2-9. 설계 순서도	16
그림 2-10. 그림 2-3-(D)의 등가회로	17
그림 2-11. 그림 2-10-(b)의 a상 등가회로	18
그림 2-12. 전류 커패시터의 용량과 충전전압에 따른 사고최대전류	19

그림 2-13. 소자 $t_q < \text{회로 } t_q$ 파형	20
그림 2-14. 소자 $t_q > \text{회로 } t_q$ 파형	20
그림 2-15. 전류 커패시터 용량과 충전전압에 따른 회로 t_q	20
그림 2-16. 그림 2-5의 a상 등가회로	21
그림 2-17. 차단모드에서 충전저항을 통해 전류가 흐르는 루프	22
그림 2-18. 그림 2-17의 등가회로	22
그림 2-19. 주 SCR과 보조 SCR과 전류 커패시터의 구조	23
그림 2-20. 전류 커패시터 용량에 따른 주 SCR의 최대전압	24
그림 2-21. 차단모드에서의 전류파형	25
그림 2-22. 주 SCR의 열회로	27
그림 2-23. 제작한 SSCB의 옆모습	28
그림 2-24. 제작한 SSCB의 앞모습	28
그림 2-25. 제작한 SSCB의 a상회로	29
그림 2-26. 제작한 SSCB의 제어회로	29
그림 2-27. 충전 모드에서 V_{C11} , V_{C22} , V_{C32} 시뮬레이션 파형	30
그림 2-28. 충전 모드에서 V_{C11} , V_{C22} , V_{C32} 실험 파형	31
그림 2-29. 전부하 차단 모드에서 V_{C11} , i_a , i_{S11} 시뮬레이션 파형	31
그림 2-30. 전부하 차단 모드에서 V_{C11} , i_a , i_{S11} 시뮬레이션 확대 파형 ...	31
그림 2-31. 전부하 차단 모드에서 V_{C11} , i_a , i_{S11} 실험 파형	32
그림 2-32. 전부하 차단 모드에서 V_{C11} , i_a , i_{S11} 실험 확대 파형	32
그림 2-33. 재충전 모드에서 V_{C11} , V_{C22} , V_{C31} 시뮬레이션 파형	33
그림 2-34. 재충전 모드에서 V_{C11} , V_{C22} , V_{C31} 실험 파형	33
그림 2-35. 무부하 차단 모드에서 V_{C11} , i_a , i_{S11} 파형	34
그림 2-36. 무부하 차단 모드에서 V_{C11} , i_a , i_{S11} 확대 파형	34

그림 2-37. 무부하 차단 모드에서 V_{Cl1} , i_a , i_{S11} 파형	34
그림 2-38. 무부하 차단 모드에서 V_{Cl1} , i_a , i_{S11} 확대 파형	35
그림 2-39. 재투입 모드와 재차단 모드에서 V_{Cl1} , i_a , i_{S11} 시뮬레이션 파형 ...	35
그림 2-40. 재투입 모드와 재차단 모드에서 V_{Cl1} , i_a , i_{S11} 파형	36
그림 2-41. 재투입 모드와 재차단 모드에서 V_{Cl1} , i_a , i_{S11} 첫 번째 차단 파형 ...	36
그림 2-42. 재투입 모드와 재차단 모드에서 V_{Cl1} , i_a , i_{S11} 두 번째 차단 파형 ...	36



표 목 차

표 2-1. AC SSCB의 파라미터	30
----------------------------	----



New Simple-Structured AC Solid-State Circuit Breaker

Seung-Min Song

Department of Electrical Engineering, The Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

These days, widespread use of sensitive loads and distributed generators makes solid-state circuit breaker (SSCB) an essential component in power circuits to achieve a high power quality for AC Grids. In the case of previous AC SSCB using SCRs, some auxiliary mechanical devices are required to make the reclosing operation possible before fault recovery. However, the proposed AC SSCB can break quickly and then be reclosed without auxiliary mechanical devices even while the short-circuit fault lasts. Moreover, its fault current breaking time is short and its SSCB reclosing operation is fast, thus resulting in the reduction of economic losses due to fault currents and power outages. Through simulations and experiments of the short-circuit faults, the performance characteristics of the proposed AC SSCB are verified. The design guideline is also suggested to design the proposed AC SSCB for various AC grids. It is anticipated that the proposed AC SSCB may be utilized to design and realize many AC grid systems.

1. 서 론

현대 사회는 IT 산업의 발전과 더불어 전력 품질에 민감하게 반응하는 부하들이 널리 보급되고 있다 [1]. 게다가 강풍, 낙뢰, 폭설 등의 자연현상에 민감한 분산전원이 보급되는 추세이므로 안정적인 전력 공급 기술이 요구된다 [2-3].

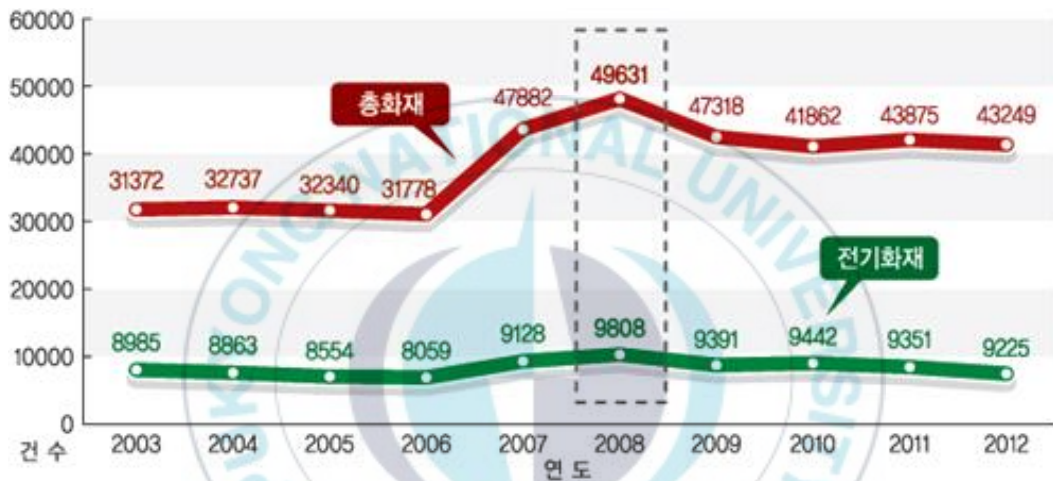


그림 1-1. 2003~2012년 전기화재 건수 (출처 : 한국전기안전공사 2014년 4월)



그림 1-2. 2012년 전기화재의 원인 분석 (출처 : 소방방재청 2014년 4월)

그림 1-1은 2003년~2012년 전기화재 건수를 나타내며, 그림 1-2는 2012년 전기화재의 원인을 분석한 그래프이다. 2012년 전기화재는 총화재의 약 21.3%로 두 번째로 높은 화재의 원인이다. 그리고 그림 1-2에서 나타나듯이, 전력계통에는 전선의 접촉으로 인한 단락사고 및 과부하로 인한 사고가 빈번하게 발생한다. 이처럼 전기 사고 발생 시 사고 전류의 신속한 차단이 이루어지지 않는다면 사고 전류의 급격한 증가와 함께 아크나 스파크로 인한 전기 화재를 동반하게 되므로 큰 피해가 발생하게 된다 [4]. 그리고 강풍, 수목 등이 원인이 되는 짧은 시간의 접촉사고의 경우에는 사고의 차단 이후에 전력이 빠르게 재투입이 되어야 하지만 오랜 시간동안 차단 상태로 유지 된다면 2차 경제적 손실이 발생한다 [5]. 이러한 이유로 차단기에는 재투입 동작과 재차단 동작을 반복 수행해야 하는 동작책무 조건이(IEC-62271-100) 규정되어 있다 [6].

이와 같이 현대 사회에는 높은 전력품질이 요구되며 특히 마이크로 그리드와 스마트 그리드에는 신속한 차단이 가능한 차단기가 반드시 필요하다 [7-9]. 반도체 차단기는 사고 발생 시 1 [ms] 이내로 차단이 가능하므로 사고의 피해를 줄일 수 있다. 하지만 기존의 반도체 차단기는 동작책무를 수행함에 있어 어려움이 따르므로 신속한 차단과 동작책무를 수행 할 수 있는 반도체 차단기가 요구된다.

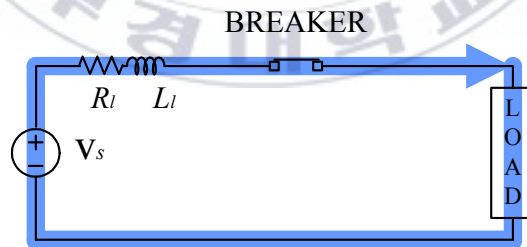


그림 1-3. 반도체 차단기를 통한 전력 공급

그림 1-3은 반도체 차단기를 통해 부하 측에 전력이 공급되는 것을 나타낸다. 그림 1-3에 나타나듯이, 전력은 반도체 차단기를 통해 공급되므로 반도체 손자의 도통손실이 크다면 전력 효율이 낮아지게 된다. 따라서 반도체 차단기

에 사용되는 반도체 소자는 도통손실이 작아야 한다.

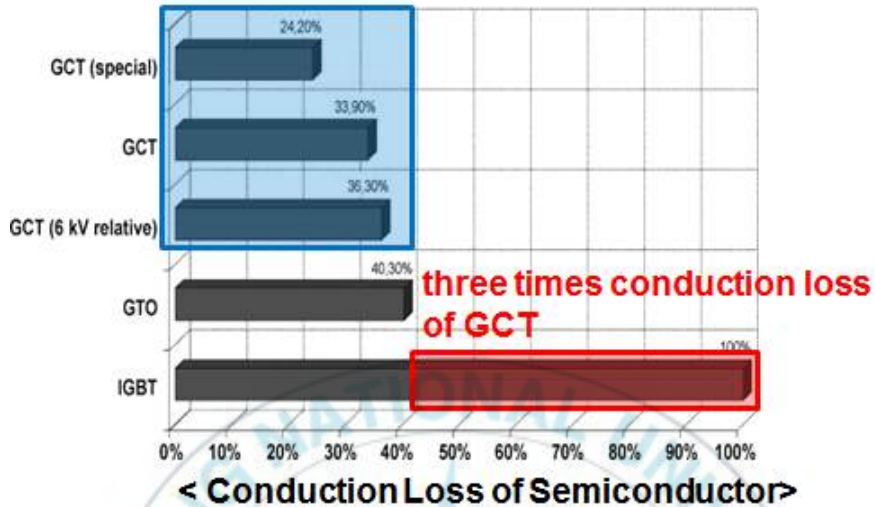


그림 1-4. 반도체 스위칭 소자 GCT, GTO, IGBT의 도통 손실

그림 1-4는 반도체 소자 GCT, GTO, IGBT의 도통손실을 나타낸다. IGBT는 GCT소자 도통손실의 약 3배가량이다. 즉, IGBT는 스위칭 동작이 용이하지만 높은 도통손실로 인해 반도체 차단기에 사용하기에 부적합하다 [10].

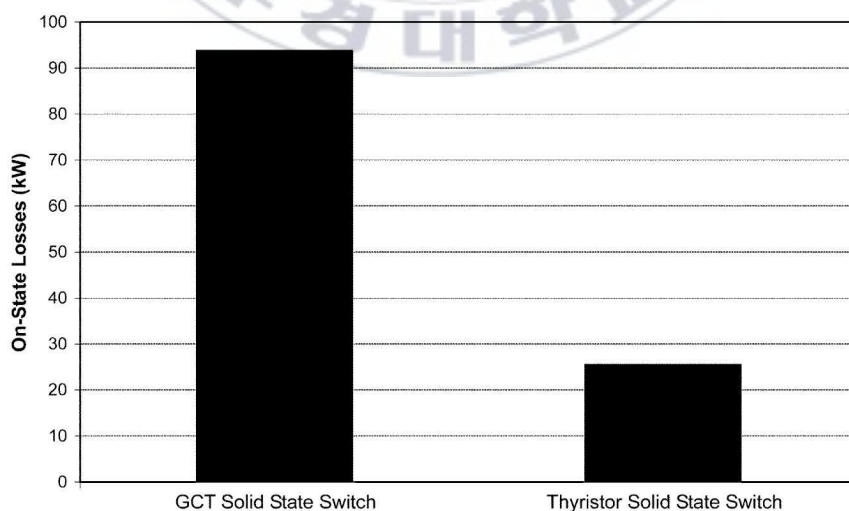


그림 1-5. 10 [kV] 정격 전력에서 GCT와 SCR의 도통손실

그림 1-5는 반도체 소자 GCT와 사이리스터(Thyristor: 이하 SCR로 표기)의 도통손실을 나타낸다. 사이리스터의 도통손실은 GCT 도통손실보다 매우 작다 [11]. 따라서 사이리스터의 도통 손실이 가장 작으므로 반도체 차단기에 사용하기 적합하다.

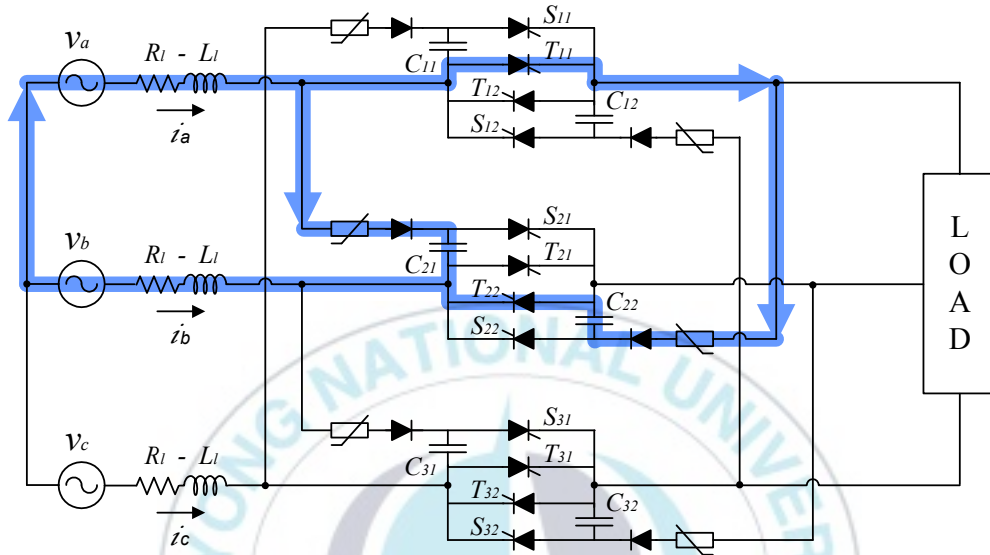


그림 1-6. 기존의 3상 SSCB에서 C_{21}, C_{22} 의 충전 루프

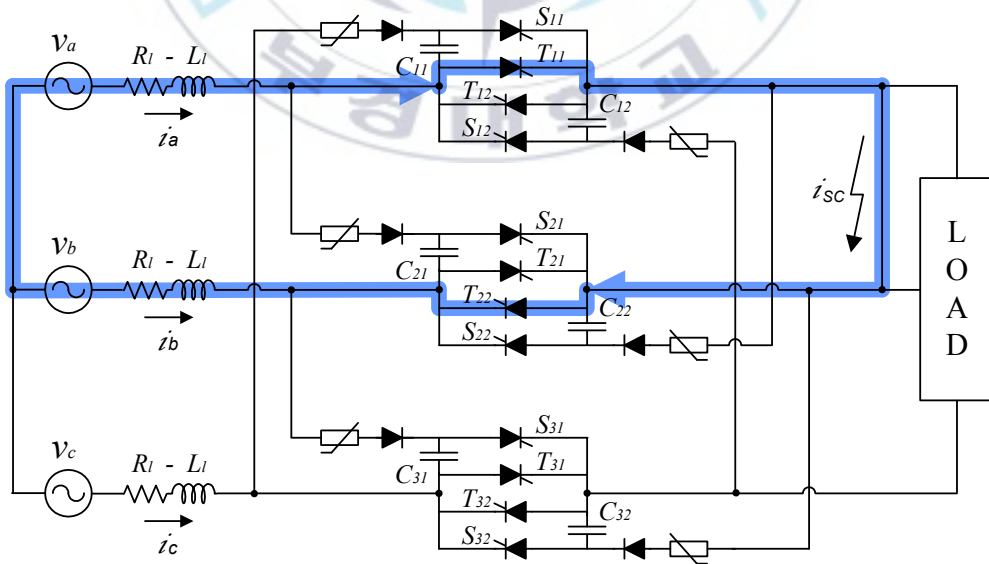


그림 1-7. 그림 1-6에서 단락사고 발생시 C_{21}, C_{22} 의 충전 루프

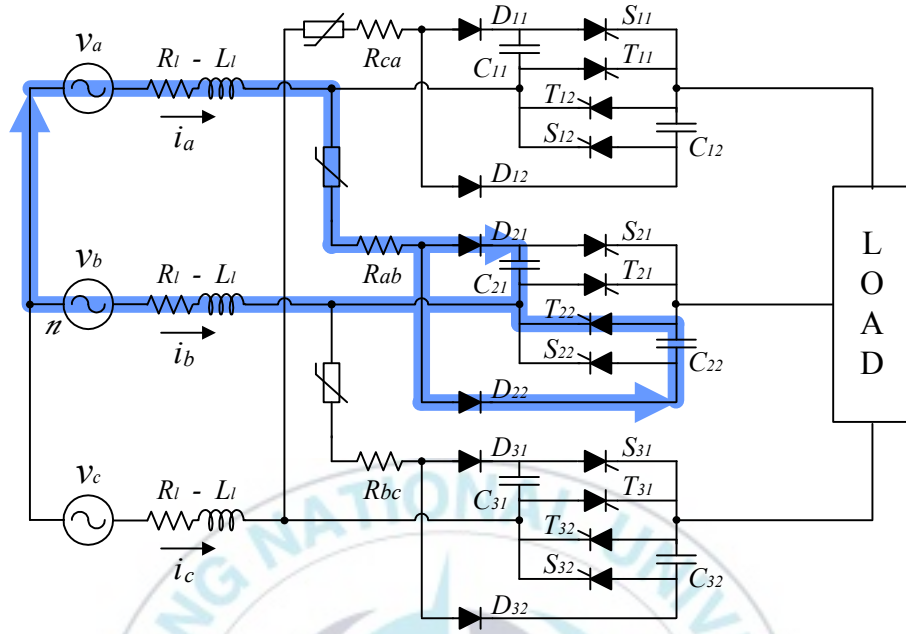


그림 1-8. 기존의 3상 SSCB와 C_{21}, C_{22} 의 충전 루프

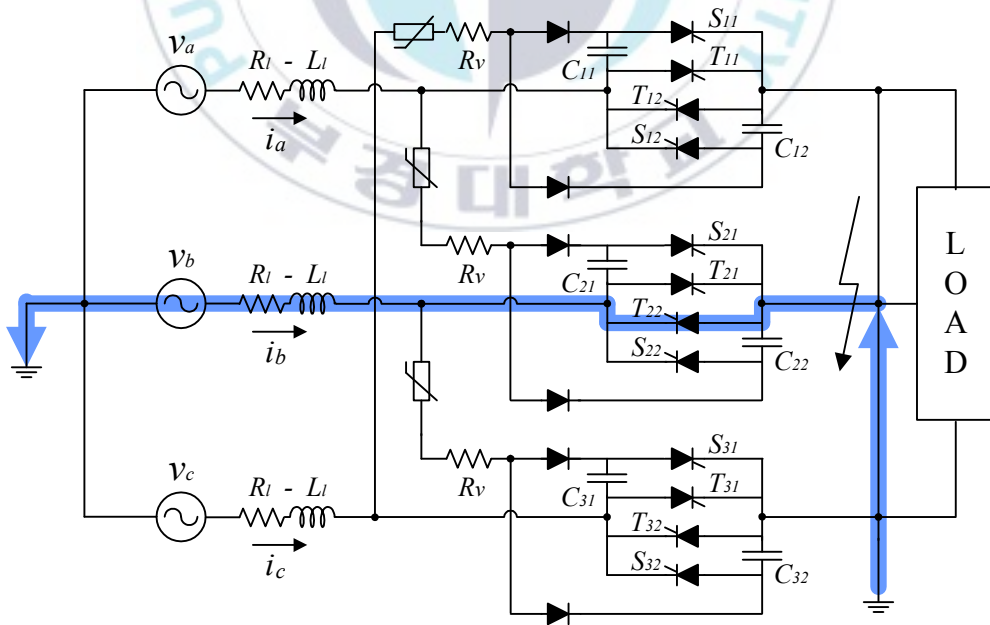


그림 1-9. 그림 1-8에서 지락사고 발생시 C_{21}, C_{22} 의 충전 루프

그림 1-6은 그림 1-7과 Ref. [11]의 그림 14에 사용된 기존의 3상 SSCB이다. 그림 1-6의 굵은 선은 b상의 전류 커패시터 C_{21} , C_{22} 가 선간전압 V_{ab} 에 의해 충전되는 루프를 나타낸다. 그림 1-6의 기존의 3상 SSCB는 단락 사고가 발생하면 빠르게 차단한다. 그러나 그림 1-7이 보여주듯이 재투입과 재차단 동작을 수행하지 못한다는 큰 단점이 있다. 더 자세히 설명한다면 그림 1-7에서 부하단에 단락 사고 발생 후 단락사고가 지속되는 경우에는 그림 1-6처럼 SCR T_{11} 과 T_{22} 를 켜서 전류 커패시터 C_{21} , C_{22} 를 충전시킬 수 없기 때문에, AC SSCB에서 중요한 재충전 및 재투입을 수행하지 못한다.

그림 1-8은 기존에 제시된 그림 1-6과는 다른 구조의 AC SSCB이며 굵은 선은 전류 커패시터 C_{21} 과 C_{22} 의 충전 루프를 나타낸다 [12,13]. 그림 1-8의 AC SSCB는 SCR T_{22} 를 턴온하면 전류 커패시터 C_{22} 가 충전이 되는 구조를 갖는다. 이와 같은 방법으로 SCR T_{12} , T_{22} , T_{32} 를 턴온하면 부하측에 단락사고가 유지된 상태에서도 전류 커패시터 C_{12} , C_{22} , C_{32} 는 충전이 된다. 따라서 그림 1-8의 AC SSCB는 재투입과 재차단의 동작책무 수행이 가능하다. 하지만 그림 1-8의 AC SSCB는 그림 1-9와 같이 3상 전원의 중성점이 직접 접지인 경우, 지락사고가 발생하면 전류 커패시터 C_{22} 의 충전이 불가능하다. 따라서 그림 1-8의 AC SSCB는 3상 전원의 중성점이 직접 접지방식인 경우에 사용하지 못하며 전류 커패시터 충전을 위한 제어가 요구되는 단점을 갖는다.

이러한 배경으로, 본 연구에서는 신속한 차단이 가능하며 재투입과 재차단 동작을 수행 할 수 있는 새로운 AC SSCB를 제안한다. 제안한 AC SSCB는 3상 전원의 중성점 접지 방식에 관계없이 적용이 가능하며 전류 커패시터를 충전하기 위한 제어가 요구되지 않는다. 또한, 본 논문에서는 제안한 AC SSCB의 설계방법을 제시한다.

제안한 AC SSCB는 선간전압 380 [V], 46 [kW]급으로 3상 단락사고를 모의하여 시뮬레이션과 실험을 통해 동작 특성을 검증한다.

2. 제안한 Solid-State Circuit Breaker

2-1. 제안한 AC Solid-State Circuit Breaker

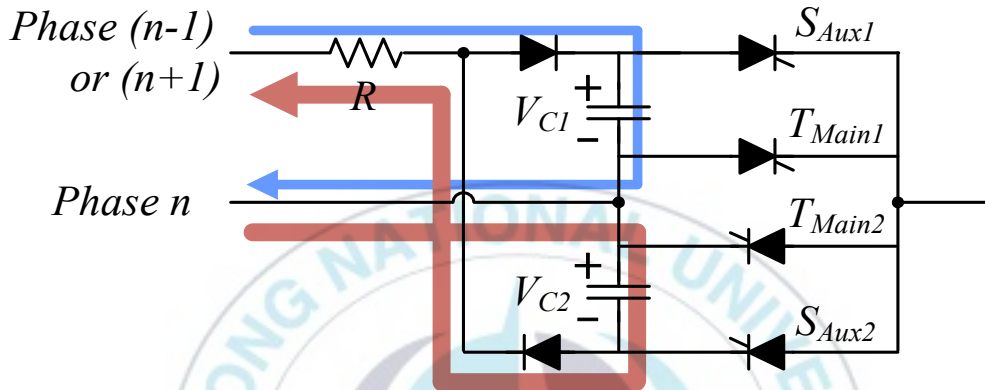


그림 2-1. 제안한 AC SSCB의 전류 커패시터 충전 방식

그림 2-1은 제안한 AC SSCB의 전류 커패시터 충전 방식을 나타낸다. 기존에 제시된 AC SSCB의 전류 커패시터 충전방식과는 달리 모든 전류 커패시터 C_1 , C_2 는 SCR을 통하지 않고 선간전압에 의해 자연 충전이 된다. 따라서 제안한 AC SSCB는 전류 커패시터의 충전을 위한 제어가 요구되지 않으며, 부하측에 단락사고 및 지락 사고가 지속되는 경우에도 전류 커패시터의 충전이 이루어진다.

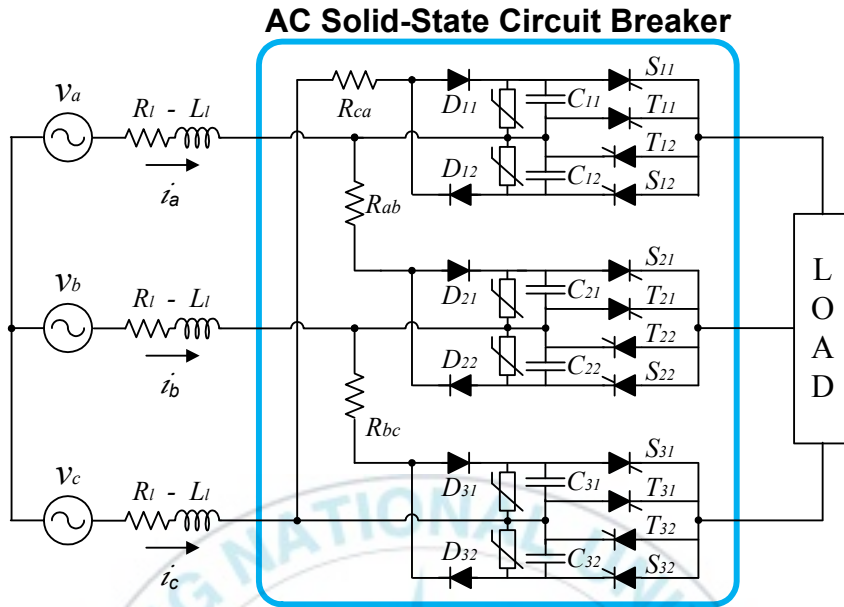


그림 2-2. 제안한 AC Solid-State Circuit Breaker(AC SSCB)

그림 2-2는 본 연구에서 제안한 AC SSCB 회로이다. 제안한 AC SSCB는 부하 측에 단락사고가 지속되는 상황에서도 전류 커패시터의 충전이 가능하다. 즉, 부하 측의 상태와 관계없이 전류 커패시터의 재충전이 가능하므로 동작책무에 따른 재투입과 재차단 동작을 수행할 수 있다 [6].

제안한 AC SSCB는 6가지 동작 모드로 나뉘어진다. 6가지 동작 모드는 전류 커패시터를 충전하는 충전 모드, 부하에 에너지를 공급하는 정상 모드, 사고 전류를 차단하는 차단 모드, 재투입 동작을 수행하기 위한 전류 커패시터의 재충전 모드, 다시 부하에 에너지를 공급하는 재투입 모드, 계속해서 사고가 유지되면 다시 차단하는 재차단 모드이다.

제안한 AC SSCB의 동작 특성에 대해, 계통에서 발생하는 사고 전류는 3상 단락 사고일 때 가장 커지므로 본 연구에서는 3상 단락 사고를 모의하여 AC SSCB의 차단과 재투입 동작을 검증한다.

그림 2-3은 제안한 AC SSCB의 각 모드에 따른 회로의 동작을 나타내며 그림 2-4는 각 모드에 따른 동작 파형을 나타낸다. 각 모드의 동작 특성은 다음과 같다.

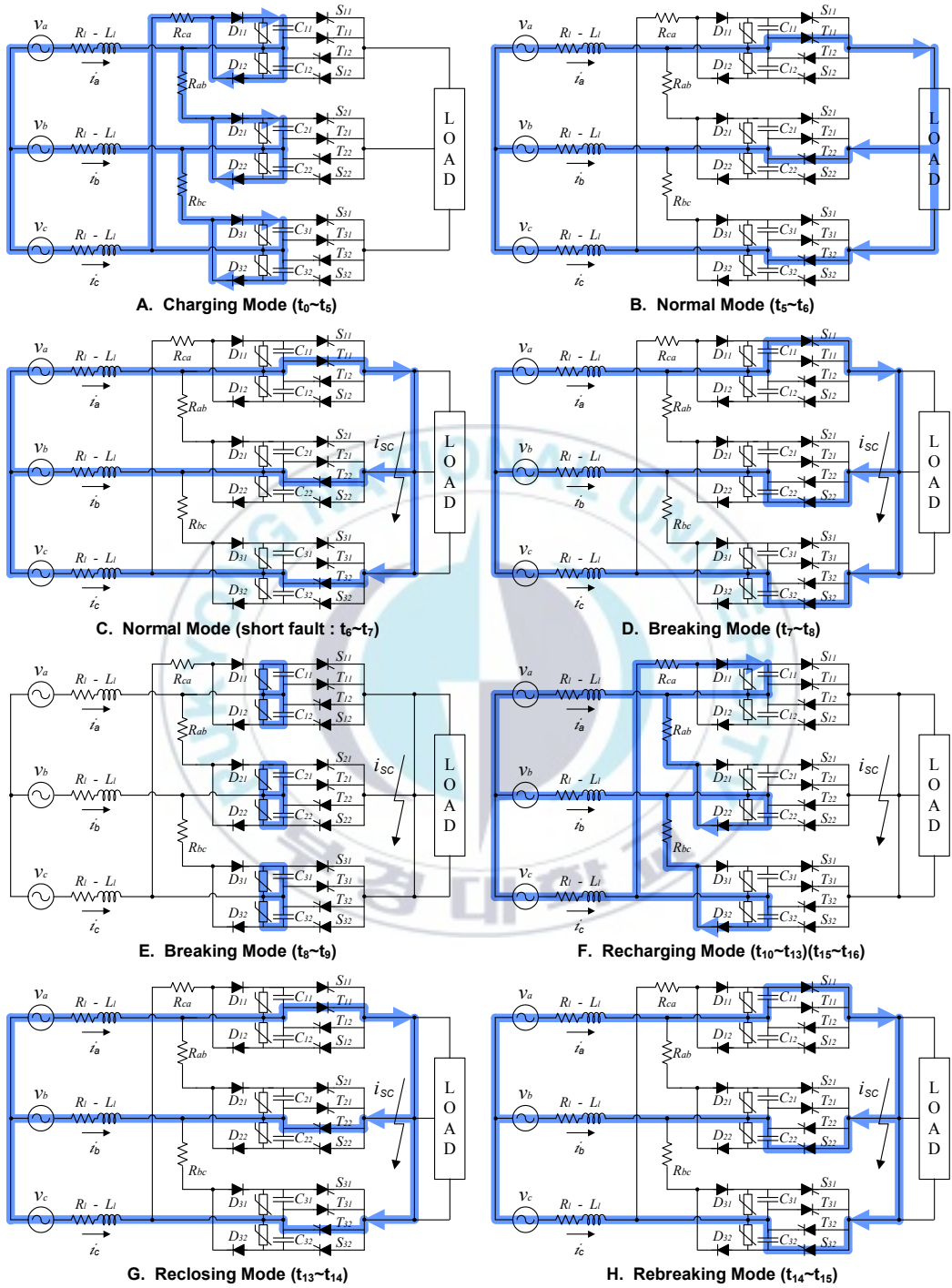


그림 2-3. 제안한 AC SSCB 동작 모드

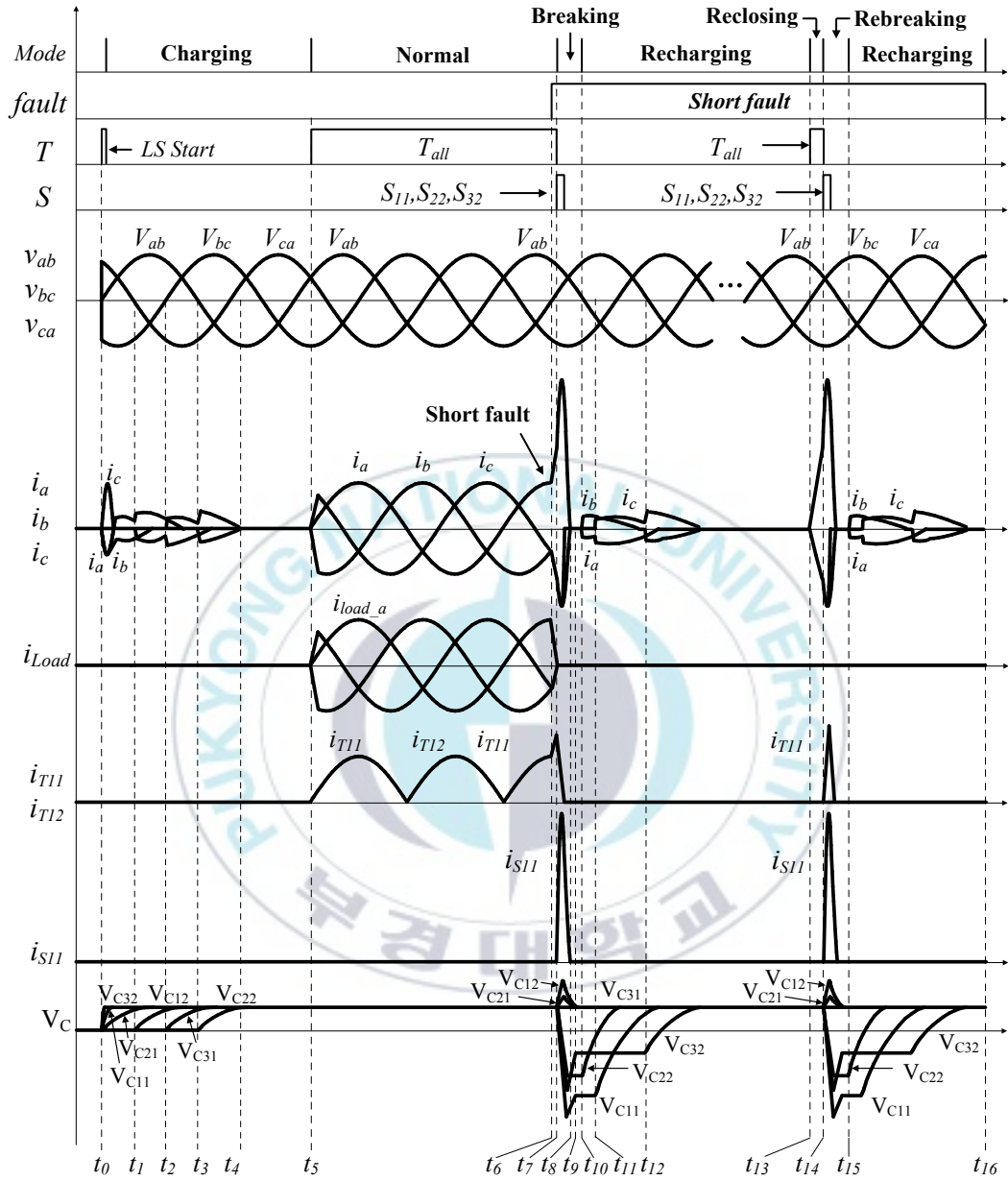


그림 2-4. 제안한 AC SSCB 동작 파형

A. 충전모드 ($t_0 \leq t < t_5$)

AC SSCB가 차단동작을 수행하려면 전류 커패시터의 충전이 선행되어야하므로 충전모드에서 AC SSCB의 모든 전류 커패시터들은 충전되어야한다. 따

라서 AC SSCB의 충전 모드($t_0 \sim t_5$)에서는 선간전압과 충전저항을 이용하여 사고 차단에 요구되는 전압으로 전류 커패시터를 충전하게 된다.

그림 2-4의 t_0 에서 LS(라인 스위치)가 턴온되면 전류 커패시터의 충전이 시작된다. 그림 2-4의 $t_0 \sim t_1$ 구간에서는 전류 커패시터 C_{11} , C_{21} , C_{32} 의 충전이 이루어지며, 그림 2-5~그림 2-7은 전류 커패시터 C_{11} , C_{21} , C_{32} 의 충전 루프를 나타낸다. 이와 같은 충전 루프를 통해 각각의 전류 커패시터들은 선간전압의 위상에 따라서 충전이 이루어진다.

이처럼, 모든 전류 커패시터들은 SCR을 포함하지 않는 충전 루프를 가지므로 전류 커패시터 충전을 위한 별도의 제어가 요구되지 않는다. 또한 부하측이 단락사고 상태이더라도 전류 커패시터의 충전이 이루어지므로 제안한 AC SSCB는 언제든지 차단동작을 수행 할 수 있다. 그림 2-4의 t_5 가 되면 정상모드가 시작된다.

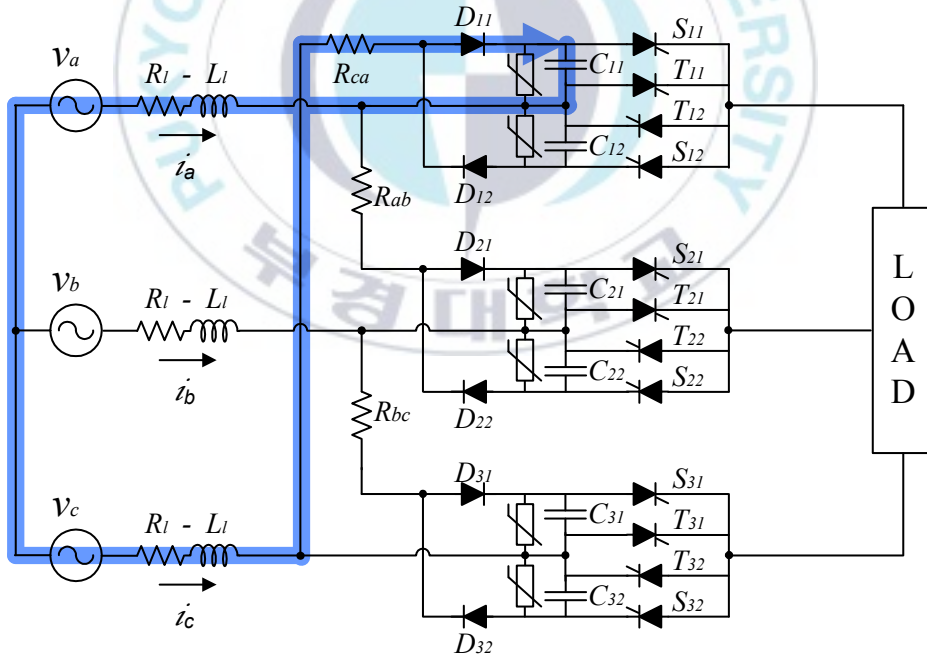


그림 2-5. 전류 커패시터 C_{11} 의 충전 루프

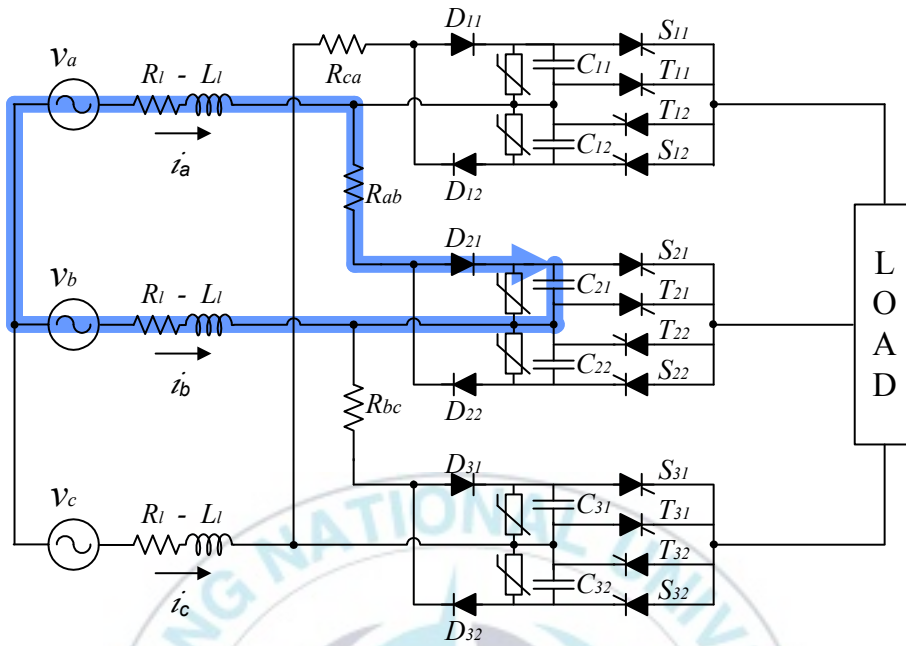


그림 2-6. 전류 커패시터 C_{21} 의 충전 루프

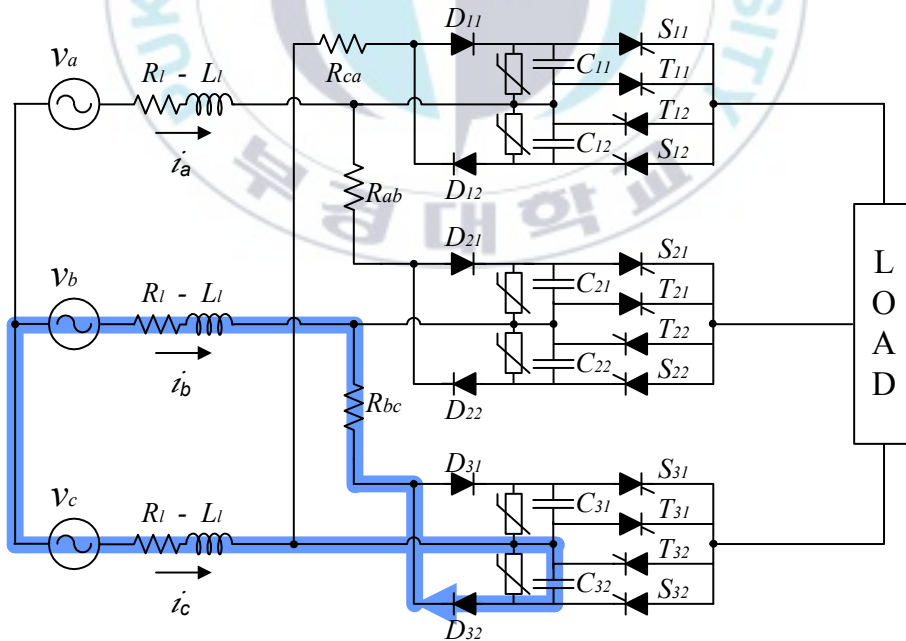


그림 2-7. 전류 커패시터 C_{32} 의 충전 루프

B. 정상모드 ($t_5 \leq t < t_6$)

정상모드는 AC SSCB의 정상 운전 모드으로써 SCR $T_{all}(T_{11}, T_{12}, T_{21}, T_{22}, T_{31}, T_{32})$ 를 턴온하면 그림 2-3의 B회로처럼 부하에 에너지를 전달하게 된다. 정상 모드에서는 전류와 전압을 검지하여 과전류 및 전압의 Sag/Swell 등 사고를 판별하게 된다.

C. 정상모드(단락 사고 발생 : $t_6 \leq t < t_7$)

그림 2-3의 모드 C는 t_6 에서 3상 단락사고가 발생하여 사고 전류가 증가하는 구간이다. 단락사고가 발생하였지만 사고전류의 크기는 사고로 판단되는 기준 전류보다 작으므로 AC SSCB는 정상모드로 동작을 한다. 상전류 i_a 가 점차 증가하여 t_7 이 되면 AC SSCB는 단락 사고로 판단하여 차단모드가 시작된다.

D. 차단모드 ($t_7 \leq t < t_8$)

차단모드는 충전된 전류 커패시터를 이용하여 사고 전류를 차단하는 구간이다. 그림 2-3의 D회로처럼 각 상전류의 방향에 맞는 보조 SCR S_{11}, S_{22}, S_{32} 가 턴온 되면 전류 커패시터 C_{11}, C_{22}, C_{32} 에 의해 주 SCR T_{11}, T_{22}, T_{32} 이 턴오프가 된다. 모든 상에는 R_L-L-C 공진 전류가 흐르게 되며 사고 전류는 감소하게 된다. 차단에 이용된 각 상의 전류 커패시터 C_{11}, C_{22}, C_{32} 는 그림 2-4의 V_C 파형처럼 역방향으로 충전이 된다.

E. 차단모드 ($t_8 \leq t < t_9$)

모드 E는 모든 사고 전류가 차단이 되고 계통에 전류가 흐르지 않는 구간이다. 그림 2-4의 t_8 에서 보조 SCR을 통해 흐르는 전류가 0이 되고 AC SSCB의 모든 SCR은 턴오프가 되므로 AC SSCB의 차단동작이 완료된다. 역방향으로 충전된 전류 커패시터의 전압이 배리스터의 항복전압보다 커지므로 전류 커패시터는 t_9 까지 배리스터를 통해 방전한다.

F. 재충전모드 ($t_{10} \leq t < t_{13}$)

재충전 모드는 AC SSCB의 차단모드에서 방전된 전류 커패시터를 재충전하는 구간이다. 그림 2-4의 t_{10} 이 되면 전류 커패시터 C_{22} 의 재충전이 시작된다. 그림 2-8은 전류 커패시터 C_{22} 의 재충전 루프를 나타낸다. t_{11} 이 되면 전류 커패시터 C_{11} 의 재충전이 시작되며 충전루프는 그림 2-5와 같다. t_{12} 가 되면 전류 커패시터 C_{32} 의 재충전이 시작되며 충전루프는 그림 2-7과 같다. 재충전 루프는 충전모드($t_0 \sim t_5$)의 충전루프와 동일하다.

전류 커패시터 C_{11} , C_{22} , C_{32} 재충전 동작($t_8 \sim t_{13}$)에서 알 수 있듯이, 차단 동작에서 사용된 전류 커패시터는 모든 SCR이 턴오프 된 상태에서 재충전 동작이 이루어진다.

제안한 AC SSCB는 부하 측에 단락 상태가 유지되더라도 전류 커패시터의 재충전이 가능하다. 재충전 모드가 완료되면 AC SSCB는 주 SCR T_{all} 을 턴온하여 재투입 동작을 하게 되며 부하측에 단락사고가 지속되고 있는 상황이라도 AC SSCB는 사고 전류의 재차단이 가능하다.

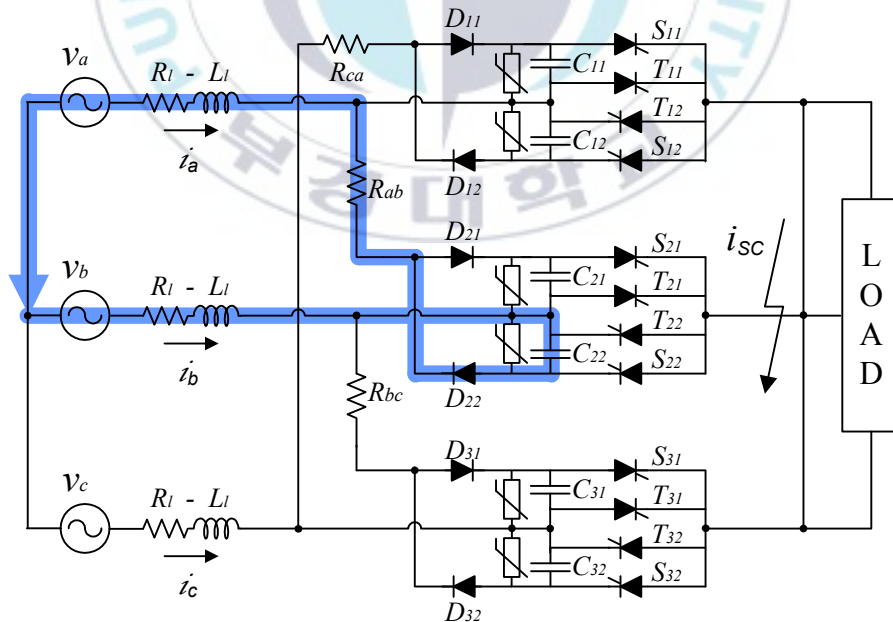


그림 2-8. 전류 커패시터 C_{22} 의 재충전 루프

G. 재투입 모드 ($t_{13} \leq t < t_{14}$)

재투입 모드는 주 SCR $T_{all}(T_{11}, T_{12}, T_{21}, T_{22}, T_{31}, T_{32})$ 이 턴온되는 구간이다. 차단기는 동작책무의 재투입 시간에 따라 재투입 동작을 하여야 한다. 따라서 부하측에는 단락사고가 지속되고 있는 상태이지만 모든 주 SCR을 턴온 하여야 한다.

단락 상태가 지속되고 있는 상태이므로 모든 주 SCR이 턴온되면 그림 2-3-G처럼 단락 사고 전류가 흐르게 된다.

H. 재차단 모드 ($t_{14} \leq t < t_{15}$)

단락사고로 판별되는 t_{14} 가 되면 AC SSCB는 재차단 동작을 시작한다. 각 상전류는 $i_a > 0$, $i_b < 0$, $i_c < 0$ 이므로 보조 SCR S_{11}, S_{22}, S_{32} 가 턴온이 된다. 재차단동작의 원리는 차단모드($t_7 \sim t_9$)의 동작과 같다.

I. 재충전 모드 ($t_{15} \leq t < t_{16}$)

$t_{15} \sim t_{16}$ 구간은 $t_{10} \sim t_{13}$ 구간처럼 전류 커패시터의 재충전이 이루어진다. 재차단 모드($t_{14} \sim t_{15}$)에서 전류 커패시터 C_{11}, C_{22}, C_{32} 가 사용되었으므로 전류 커패시터 C_{11}, C_{22}, C_{32} 가 재충전이 된다. 전류 커패시터의 재충전이 완료되면 AC SSCB는 동작책무의 규정에 따라 재투입 재차단 동작을 하게 된다.

2-2. 제안한 AC Solid-State Circuit Breaker의 설계

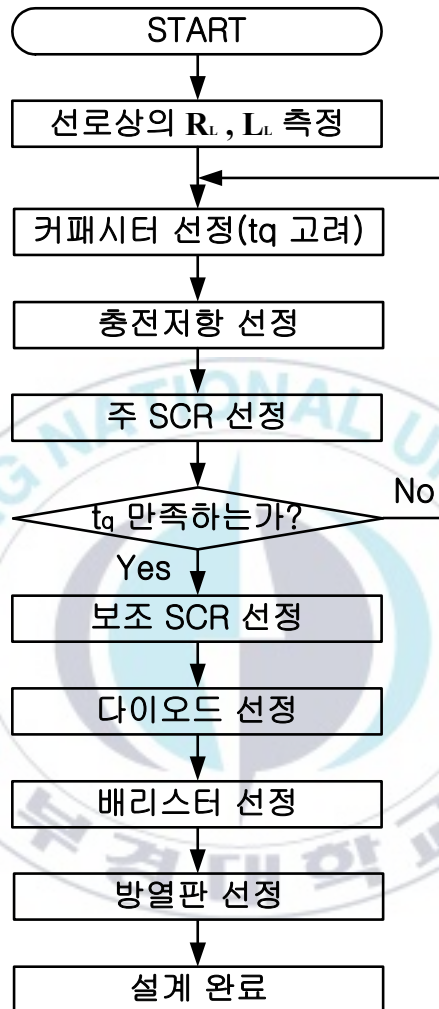


그림 2-9. 설계 순서도

그림 2-9는 설계순서도를 나타낸다. 설계순서도는 크게 선로조건 측정, 충전 회로부 설계 및 주회로 소자 선정, 전류회로부 설계, 발열부 설계의 4가지 단계로 이루어진다. 그림 2-9의 설계순서도의 각 단계에 의한 반도체 차단기의 설계 과정을 상세히 기술하면 다음 각 절에서 기술된 바와 같다.

2-2-3. 선로조건 측정

선로조건이란, 차단기를 설치하는 장소의 선로저항과 선로인덕턴스를 말한다. 충전모드에서 충전저항을 설계할 경우 정확한 선로저항 값이 요구된다. 선로인덕턴스는 차단모드에서 저장된 에너지를 전류 커패시터로 전달한다. 그러므로 차단모드에서 전류 커패시터를 설계하기 위해서 선로인덕턴스의 값이 요구된다. 차단기를 설계하기 전에 먼저 선로조건을 측정해야 한다.

본 논문에서 차단기가 설치된 곳의 선로저항은 $100[\text{m}\Omega]$, 선로 인덕턴스는 $35[\mu\text{H}]$ 로 측정되었다.

2-2-3. 전류 커패시터 선정

사고 발생 시 최대 사고전류는 전류커패시터를 통해 흐르므로 전류 커패시터 선정을 위해서 최대 사고 전류가 계산되어야한다. 그림 2-10은 제안한 AC SSCB의 차단모드에서의 3상 등가회로를 나타낸다. 최대 사고 전류는 그림 2-10의 등가회로를 통해 구할 수 있다.

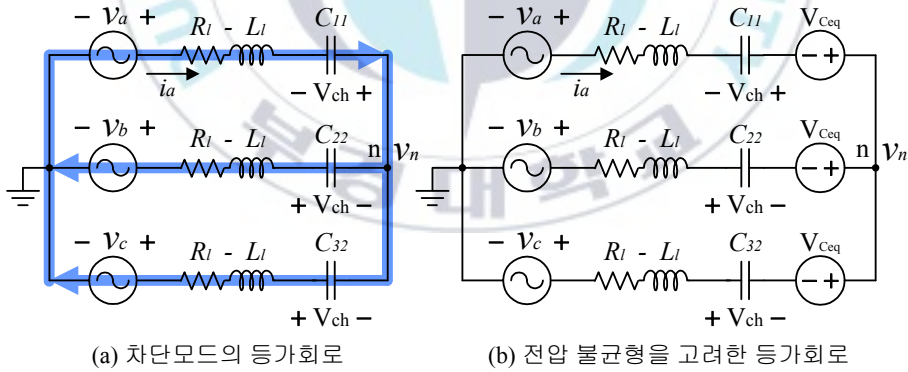


그림 2-10. 그림 2-3-(D)의 등가회로

$$\frac{V_n + V_a - V_{ch}}{Z} + \frac{V_n + V_b + V_{ch}}{Z} + \frac{V_n + V_c + V_{ch}}{Z} = 0 \quad (2-1)$$

$$V_{Ceq} = -V_n = \frac{V_{ch}}{3} [V] \quad (V_a + V_b + V_c = 0) \quad (2-2)$$

그림 2-10의 (a)회로에서 a상의 전류 커패시터 전압 V_{C11} 은 다른 상의 전류 커패시터 전압 V_{C22} , V_{C32} 와 전압 방향이 다르므로 n지점의 전압 V_n 은 0[V]가 아니다. a상의 등가회로를 구하기 위해서는 n지점의 전압 V_n 이 0[V]가 되어야하므로 식 (2-1)과 식 (2-2)을 이용하여 전류 커패시터의 보상 전압 V_{Ceq} 를 구할 수 있다. Z는 선로 임피던스 R_l , L_l 과 전류 커패시터 C의 임피던스이며 그림 2-10의 (a)회로와 (b)회로에 흐르는 각 상의 상전류는 같다.

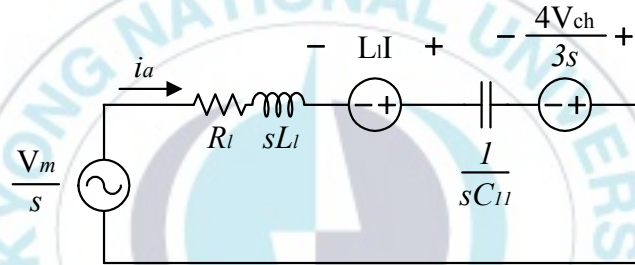


그림 2-11. 그림 2-10-(b)의 a상 등가회로

그림 2-11은 그림 2-10-(b) 회로의 a상 라플라스 등가회로이다. 따라서 상전류 i_a 는 식 (2-3)이 되며 이때 I는 차단인식전류, 즉 전류 커패시터를 통해 전류가 흐르기 시작할 때 인덕터의 초기 전류이다.

$$I_a(s) = \frac{sL_l I + \frac{4 + \sqrt{3}}{3} V_{ch}}{L_l s^2 + R_l s + \frac{1}{C_{11}}} \quad (2-3)$$

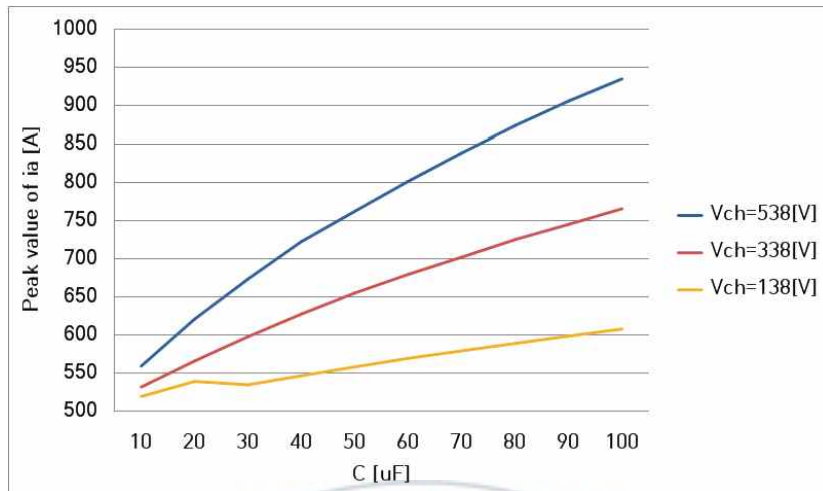


그림 2-12. 전류 커패시터의 용량과 충전전압에 따른 사고최대전류

식 2-3을 이용하여 그림 2-12와 같은 전류 커패시터의 용량과 충전전압에 따른 사고최대전류 그래프를 얻을 수 있다. 그림 2-12에서 알 수 있듯이 충전전압이 크고 전류 커패시터의 용량이 클수록 사고최대전류는 커진다.

전류 커패시터를 선정하기 위해 고려되어야 할 또 다른 사항은 주 SCR의 턴 오프 타임이다. 비록 SCR에 흐르는 전류가 0이 되어도 SCR은 즉시 턴 오프 되지 않고 완전히 턴 오프되기 위한 턴 오프 타임이 필요하다. 따라서 SCR이 완전히 턴오프가 될 때까지 전류 커패시터의 전압을 양을 유지하여야 한다. 본 논문에서는 실제 SCR의 턴 오프 타임을 소자 t_q 로 정의 하였고, SCR T_{main} 의 전류가 0이 되고 전류 커패시터의 전압이 0이 될 때까지의 시간을 회로 t_q 로 정의하였다. 그림 2-13과 그림 2-14는 시간에 따른 회로 t_q 의 파형을 나타낸다.

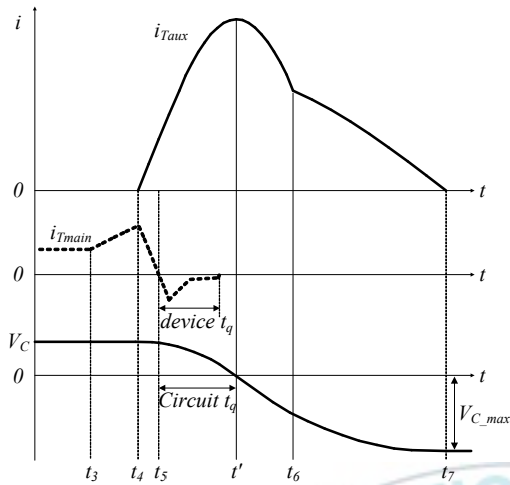


그림 2-13. 소자 $t_q <$ 회로 t_q 파형

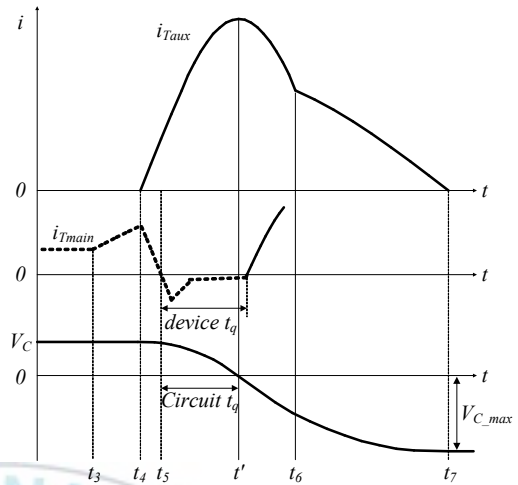


그림 2-14. 소자 $t_q >$ 회로 t_q 파형

그림 2-13에서 보는 바와 같이 회로 t_q 가 소자 t_q 보다 긴 회로의 경우 SCR T_{main} 이 정상적으로 턴 오프 된다. 하지만 그림 2-14와 같이 회로 t_q 가 소자 t_q 보다 짧은 회로의 경우 SCR T_{main} 이 정상적으로 턴 오프 되지 않는다. 그러므로 회로 t_q 은 소자 t_q 보다 항상 크게 회로가 설계되어야 한다.

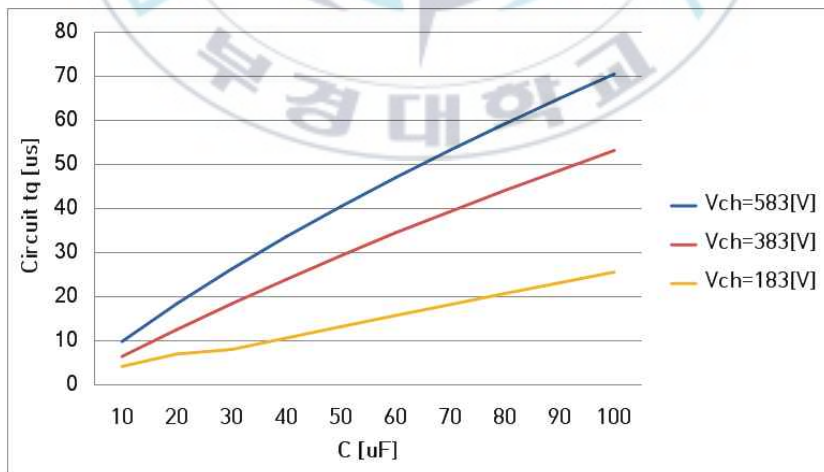


그림 2-15. 전류 커패시터 용량과 충전전압에 따른 회로 t_q

그림 2-15는 차단모드에서 전류 커패시터의 용량과 충전전압에 따른 회로

t_q 를 나타낸 그래프이다. 전류 커패시터의 용량이 크고 충전된 전압이 클수록 회로 t_q 가 길어진다. 하지만 회로 t_q 를 보장하기 위해 큰 용량의 전류 커패시터를 선정하거나 충전 전압을 높게 하게 되면 사고최대전류의 크기가 커지게 된다. 그러므로 그림 2-12와 그림 2-15를 이용해 전류 커패시터의 용량을 적절하게 선정해야한다. 본 논문에서 전류 커패시터의 용량은 25[uF], 충전전압은 583[V]로 설계되었으며, 그에 따라 사고최대전류는 648[A], 회로 t_q 는 22[us]가 된다.

2-2-3. 충전회로부 설계 및 주회로소자 선정

전류 커패시터가 선정되면 충전저항을 선정해야한다. 충전저항은 충전모드에서 전류 커패시터가 과전압충전이 되지 않도록 충전전류를 제한하는 역할을 한다. C_{11} 이 충전되는 회로는 그림 2-5와 같고 그림 2-16은 그림 2-5의 a상 등가회로이다.

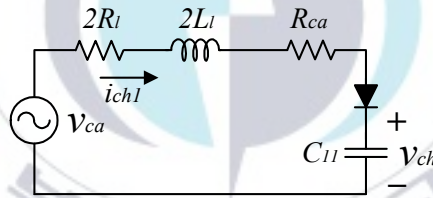


그림 2-16. 그림 2-5의 a상 등가회로

$$I_{ch1}(s) = \frac{V_{ca}\sqrt{2}}{2L_l s + (2R_l + R_v) + \frac{1}{sC_{11}}} \quad (2-4)$$

$$R_{ca} \geq \sqrt{\frac{8L_l}{C_{11}}} - 2R_l \quad (2-5)$$

전류 커패시터를 충전하는 전류는 식 (2-4)과 같고, 과전압충전이 되지 않기 위해서는 식 (2-5)의 조건을 만족해야한다.

또한 차단모드에서 그림 2-17과 같이 충전저항을 통해 전류가 흐르는 루프가 발생한다.

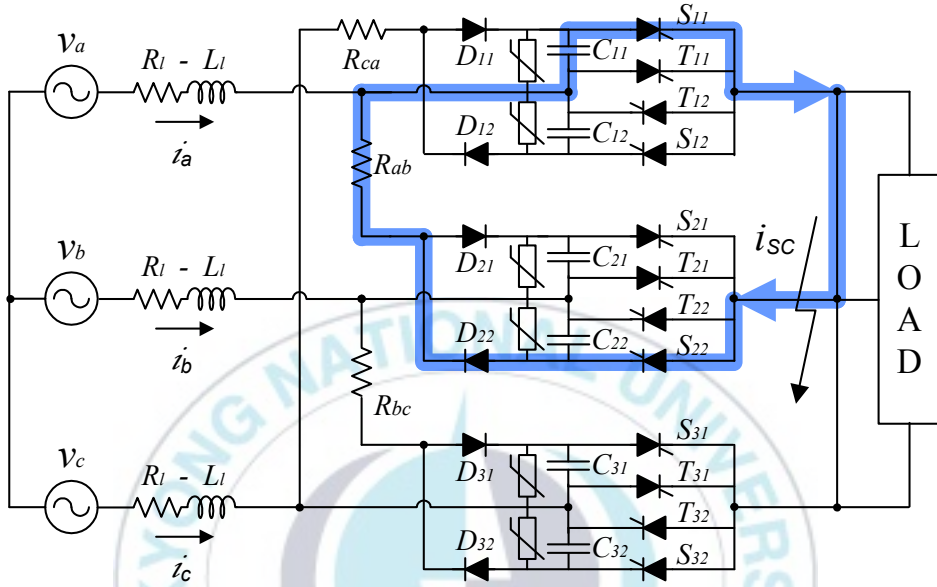


그림 2-17. 차단모드에서 충전저항을 통해 전류가 흐르는 루프

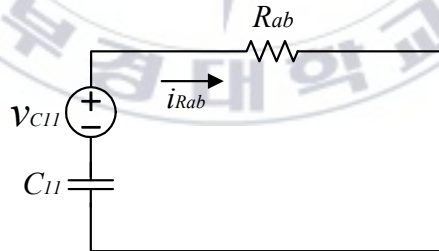


그림 2-18. 그림 2-17의 등가회로

그림 2-18은 그림 2-17의 등가회로이다. 이 때 단락사고 저항은 매우 작다고 가정하면 충전저항을 통해 흐르는 전류는 식 (2-6)과 같다.

$$I_{Rab}(s) = \frac{C_{11} V_{C11}}{R_{ab} C_{11} s + 1} \quad (2-6)$$

식 (2-6)에 따라 R_{ab} 가 작을수록 전류 커패시터에 많은 전류가 흐르게 되고 이로 인해 회로 t_q 또한 감소하게 된다. 하지만 충전저항이 크면 식 2-4에 나타나듯 충전모드에서 전류 커패시터의 충전시간이 오래 걸리므로 적절하게 선정되어야한다. 본 논문에서 충전저항은 $5[\Omega]$ 로 선정하였다.

충전저항을 선정하면 마지막으로 주 SCR을 선정해야한다.

계통에 단락사고가 발생하면 전류가 증가하게 되고 차단기는 전류를 검지해서 일정이상의 전류가 흐르면 차단동작을 수행한다. 이때, 차단기가 사고라고 인식하는 전류를 차단인식전류라고 정의한다. 보조SCR이 턴온되면 주 SCR에 흐르는 전류는 감소하므로 최대전류는 차단인식전류와 같다. 설계사양에서 차단인식전류는 $500[A]$ 이므로 주 SCR에 흐르는 최대전류는 $500[A]$ 이다.

그림 2-19는 주 SCR과 보조 SCR과 전류 커패시터의 구조를 나타낸 회로이다.

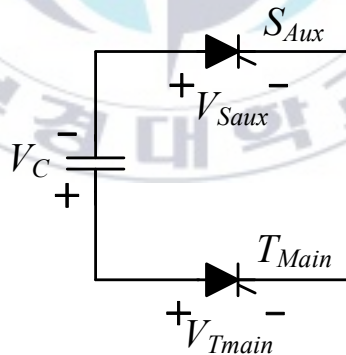


그림 2-19. 주 SCR과 보조 SCR과 커패시터의 구조

$$V_{Tmain} = V_C + V_{Saux} \quad (2-7)$$

주 SCR의 전압은 식 (2-7)과 같다. 전류 커패시터의 역방향 최대전압에 비

해 보조 SCR의 도통전압은 매우 작으므로 주 SCR에 인가되는 최대전압은 전류 커패시터의 역방향 최대전압과 같다. 전류 커패시터의 역방향 최대전압은 앞서 선정한 전류 커패시터의 용량과 충전전류에 의해 결정된다.

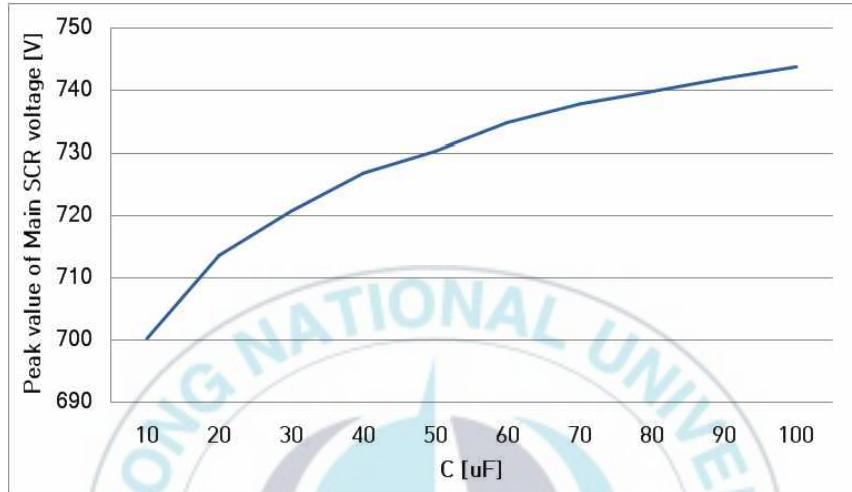


그림 2-20. 전류 커패시터 용량에 따른 주 SCR의 최대전압

그림 2-20은 전류 커패시터 용량에 따른 주 SCR의 최대전압을 나타낸다. 전류 커패시터의 용량이 커지면 주 SCR에 인가되는 전압도 커진다. 본 논문에서 주 SCR의 최대전압은 716[V]이고 소자 t_q 는 8[us]이다.

2-2-6. 전류회로부 설계

전류회로부는 보조 SCR, 다이오드, 배리스터로 이루어져있다.

보조 SCR은 차단동작을 수행하는 짧은 시간동안만 켜주는 소자이므로 최대 전류와 최대전압을 고려해서 선정한다.

그림 2-21은 차단모드에서 a상전류가 최대일 때 a상의 전류파형을 나타낸다. 그림에서와 같이 차단인식전류가 되면 보조 SCR이 턴온되고, 충전저항을 통해 흐르는 전류 때문에 보조 SCR 전류 i_{S11} 이 전원전류 i_a 보다 커지는 구간이 존재한다.

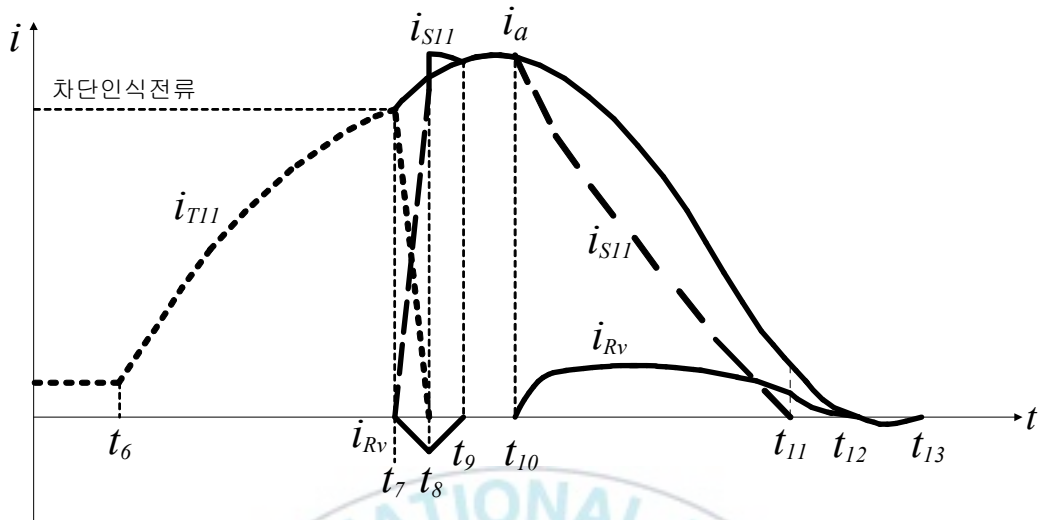


그림 2-21. 차단모드에서의 전류파형

그림 2-21에서와 같이 보조 SCR의 최대전류는 i_a 의 최대전류와 비슷하다. 그러므로 그림 2-12의 사고최대전류를 고려하여 보조 SCR을 선정하면 된다. SCR은 소자 특성상 정격최대전류가 다른 반도체 소자에 비해 매우 크기 때문에 보조 SCR을 선정하는 것이 어렵지 않다. 본 논문에서 보조 SCR의 최대전류는 648[A]이다.

차단모드에서 전류 커패시터가 역방향으로 충전되었을 때 보조 SCR에 최대전압이 인가된다. 그 때의 보조 SCR의 최대전압은 다음과 같다.

$$V_C + V_a = V_{Saux} \quad (2-8)$$

식 (2-8)에서와 같이 보조 SCR의 최대전압은 전류 커패시터의 역방향 최대전압과 계통의 상전압에 의해 결정된다. 본 논문에서 보조 SCR의 최대전압은 689[V]이다.

다이오드는 충전모드와 차단모드에서 다이오드를 통해 흐르는 전류를 고려해서 선정한다. 충전전류는 식 (2-4)에서 계산되었으며 차단모드에서 다이오드를 통해 흐르는 전류는 식 (2-6)에서 계산되었다. 두 전류 모두 한시적으로 흐

르기 때문에 다이오드의 평균전류를 고려하기보다는 최대전류를 고려해서 선정하는 것이 좋다. 본 논문에서 다이오드에 흐르는 최대전류는 255[A]이다.

배리스터는 항복전압과 에너지를 고려해서 선정한다.

배리스터의 항복 전압은 정상모드에서 전류 커패시터의 충전전압보다 크게 선정해야한다. Swell이 발생했을 때, 전류 커패시터가 과전압 충전되지 않아야 하므로 배리스터의 항복전압은 선간전압의 1.1배로 선정하는 것이 좋다.

전류 커패시터의 전압이 배리스터의 항복전압보다 커지면 배리스터는 켜지고 전류 커패시터의 에너지는 배리스터에 전달된다. 전류 커패시터의 역방향 최대전압을 고려해서 배리스터의 에너지를 결정한다.

2-2-9. 방열부 설계

방열판은 차단기의 각 소자에서 발생하는 열을 고려해서 선정해야 한다. 하지만 수백 usec의 차단과정에서 발생하는 보조 SCR, 다이오드 및 배리스터의 열들은 매우 짧은 시간 동안만 발생하므로 고려하지 않아도 된다. 따라서 방열판의 설계는 주 SCR만 고려하여 선정하면 된다.

방열판을 선정하기 위해서는 먼저 주 SCR의 총 도통손실 P_{total} 을 구해야하며 다음 수식들을 통해 구해진다.

- P_{TO} : SCR의 문턱전압으로 인한 도통손실
- R_T : SCR의 내부저항
- P_T : SCR의 내부저항으로 인한 도통손실

$$I_{avg} = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} i_a(t) dt \quad (2-9)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} i_a^2(t) dt} \quad (2-10)$$

$$P_{TO} = V_{TO} \times I_{avg} \quad (2-11)$$

$$P_{RT} = I_{rms}^2 \times R_T \quad (2-12)$$

$$P_{total} = P_{TO} + P_{RT} \quad (2-13)$$

식 (2-13)으로 부터, 총 도통손실을 구할 수 있다. 방열판을 선정하기 위해 최종적으로 요구되는 열저항 R_{ha} (방열판과 공기와의 열저항)는 그림 2-22와 식 (2-14)로 부터 구할 수 있다.

- T_j : junction의 온도
- T_a : 주변공기의 온도
- R_{jc} : junction과 case의 열저항
- R_{ch} : case와 방열판 사이의 열저항
- R_{ha} : 방열판과 주변공기 사이의 열저항

$$T_j = P_{Total} \times (R_{jc} + R_{ch} + R_{ha}) + T_a \quad (2-14)$$

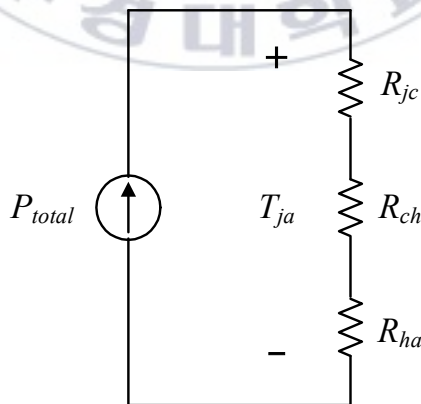


그림 2-22. 주 SCR의 열회로

주 SCR의 문턱전압과 내부저항, 열저항, 정격온도를 고려해서 전부하로 동작할 경우의 T_j 가 설정치를 만족하도록 방열판을 설계한다. 일반적으로 Si으로 만들어진 반도체 소자의 정격온도는 $150[^\circ\text{C}]$ 이다. 그러므로 주변 공기의 온도가 높고 공기의 유동이 많지 않은 장소에 설치되는 것을 고려해서 전부하일 경우 T_j 를 $110[^\circ\text{C}]$ 가 되도록 설계하는 것이 좋다.

2-2-10. 제안한 SSCB의 제작

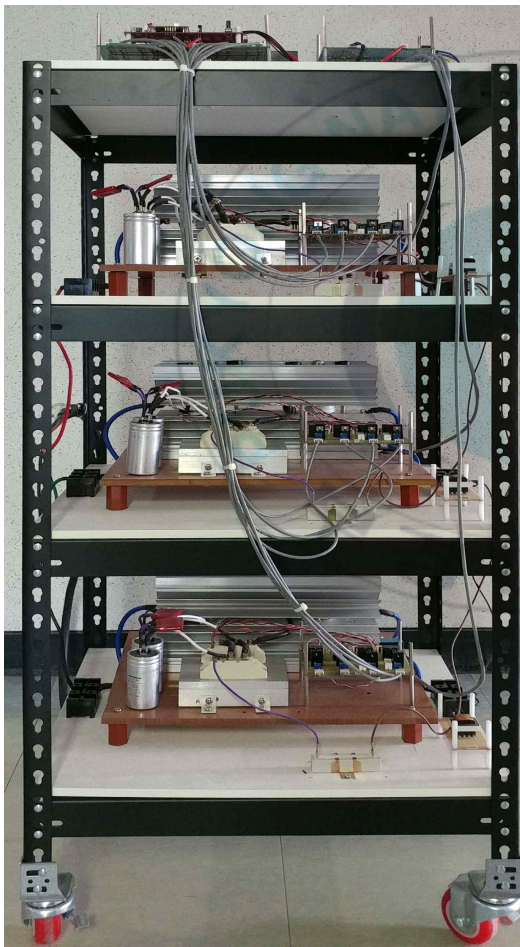


그림 2-23. 제안한 SSCB의 옆모습

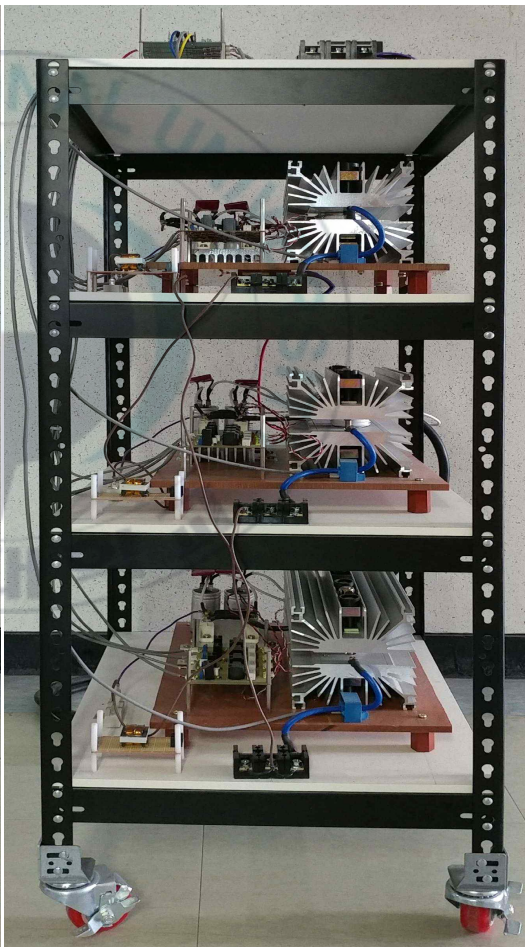


그림 2-24. 제안한 SSCB의 앞모습

그림 2-23과 2-24는 제안한 SSCB의 옆모습과 앞모습의 사진이다. 총 4층으로 이루어져 있으며, 최상층은 제어회로부이며, 최상층을 제외한 각 층에는 각 상에 해당하는 전력회로로 구성되어 있다.

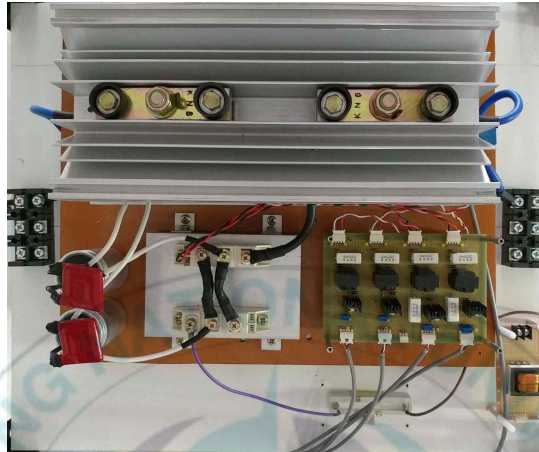


그림 2-25. 제안한 SSCB의 a상 회로

그림 2-25는 제안한 SSCB의 a상 회로의 사진이다.

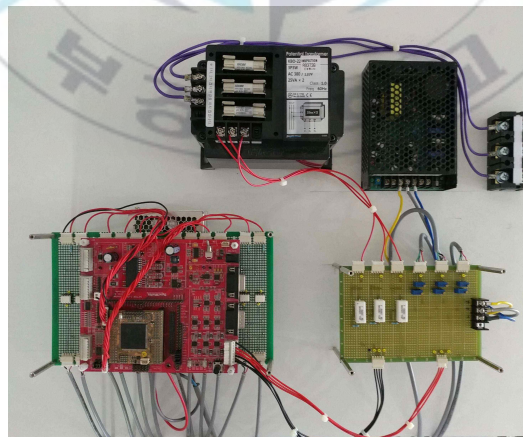


그림 2-26. 제안한 SSCB의 제어회로

그림 2-26은 제안한 SSCB의 제어회로의 사진이다. 각 상의 전압과 전류를 검지해서 차단동작을 수행하도록 제작되어있다.

2-3. 시뮬레이션 및 실험 결과

Power	46.67 [kW]
Line Voltage	380 [V]
Full load current	100 [A_{peak}]
Line resistance R_L	100 [$m\Omega$] (1.316%)
Line inductance L_L	35 [μH] (0.1736%)
R	5 [Ω]
C	25 [μF]
short fault switch resistance	200 [$m\Omega$]
Range of trip setting	100[A_{peak}] $\rightarrow$ 500[A_{peak}]

표 2-1. AC SSCB의 파라미터

표 2-1은 제작된 SSCB의 소자 파라미터를 나타낸다. 제안한 SSCB는 3상 단락사고를 모의하여 동작 특성을 검증하였으며 재충전은 3상 단락사고 상태에서 수행되었다. 충전모드, 전부하 차단모드, 재충전모드, 무부하 차단모드, 동작책무에 대해 실험하였으며, 각 모드의 실험 결과는 다음과 같다.

A. 충전 모드

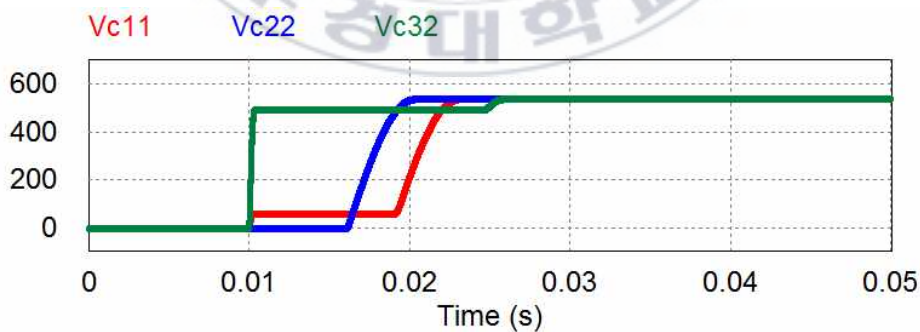


그림 2-27. 충전 모드에서 V_{C11} , V_{C22} , V_{C32} 시뮬레이션 파형

그림 2-27은 충전 모드($t_0 \sim t_5$)에서 전류 커패시터 C_{11} , C_{22} , C_{32} 전압의 시뮬레이션 파형이다. 그림 2-28은 그림 2-27의 실험 파형이다. 별도의 스위칭 동작

없이 전류 커패시터가 자연충전 되는 것을 확인 할 수 있다.

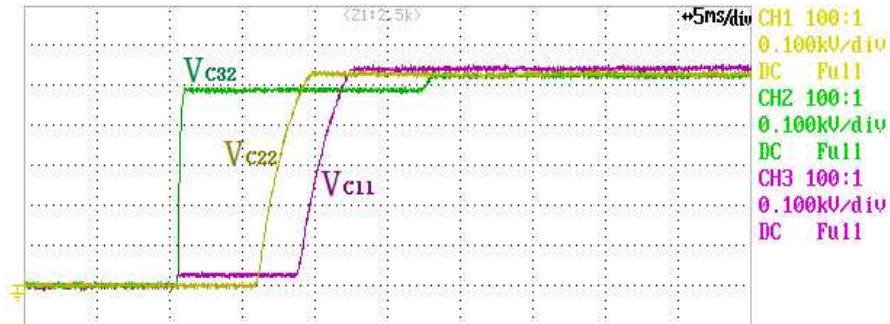


그림 2-28. 충전 모드에서 V_{C11} , V_{C22} , V_{C32} 실험 파형

B. 전부하 차단 모드

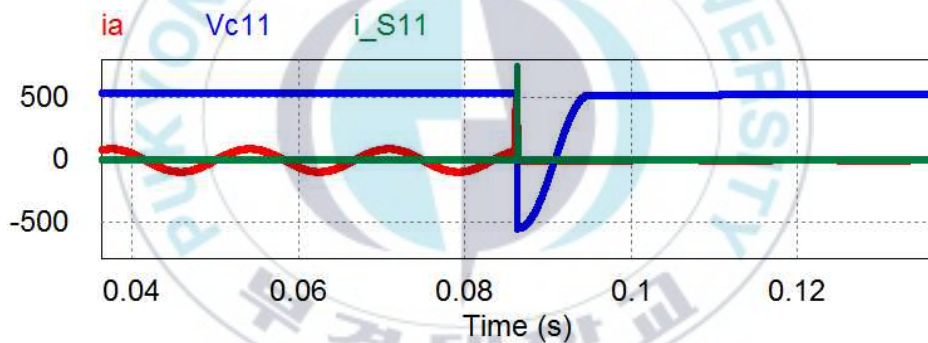


그림 2-29. 전부하 차단 모드에서 V_{C11} , i_a , i_{S11} 시뮬레이션 파형

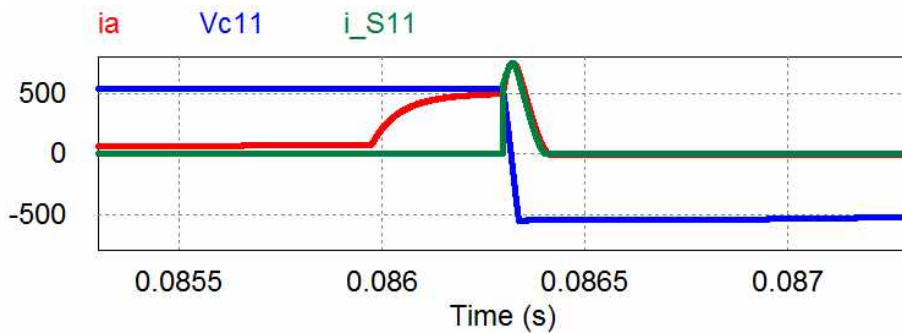


그림 2-30. 전부하 차단 모드에서 V_{C11} , i_a , i_{S11} 시뮬레이션 확대 파형

그림 2-29는 전부하 차단모드에서 a상에 흐르는 전류 i_a , i_{s11} 과 전류 커패시터 전압 V_{C11} 의 시뮬레이션 파형이고, 그림 2-30은 그림 2-29를 확대한 시뮬레이션 파형이다.

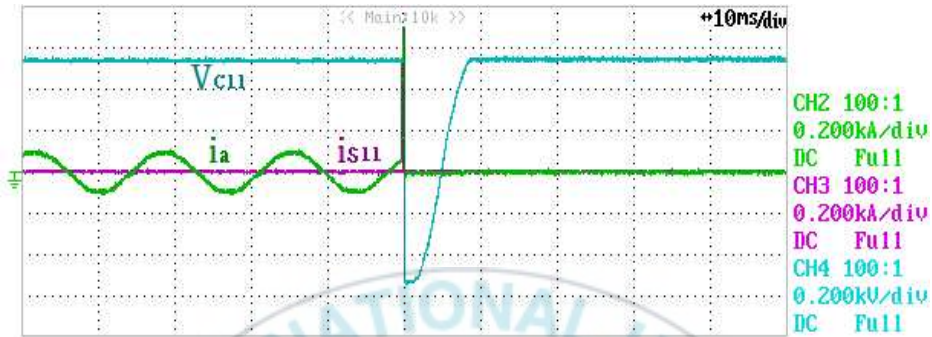


그림 2-31. 전부하 차단 모드에서 V_{C11} , i_a , i_{s11} 실험 파형

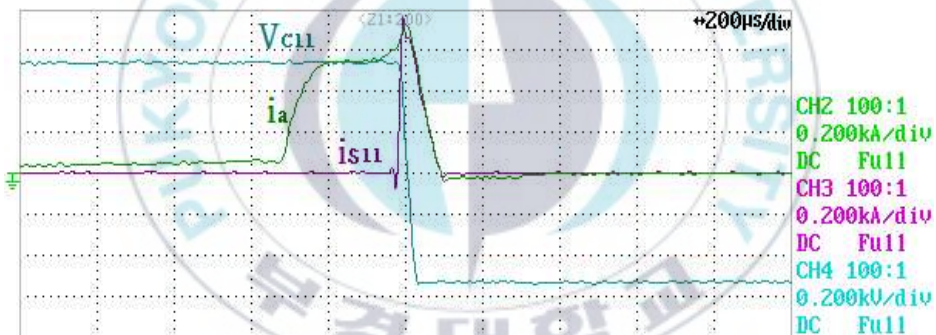


그림 2-32. 전부하 차단 모드에서 V_{C11} , i_a , i_{s11} 실험 확대 파형

그림 2-31은 그림 2-29의 실험 파형이며, 그림 2-32는 그림 2-30의 실험 파형이다. 전부하로 전력을 공급하는 도중에 단락사고가 발생한 경우를 모의하였다. i_{s11} 이 흐르기 시작하고 사고 전류가 500[us]이내로 차단되는 것을 확인할 수 있다. 시뮬레이션 결과와 실험 측정 결과가 일치하는 것을 볼 수 있다.

C. 재충전 모드

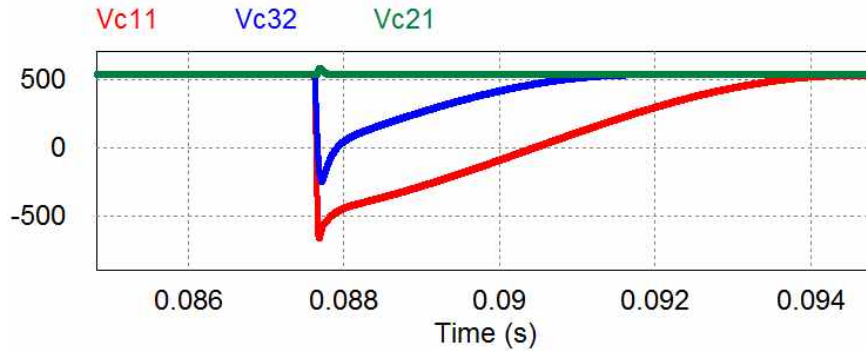


그림 2-33. 재충전 모드에서 V_{C11} , V_{C22} , V_{C31} 시뮬레이션 파형

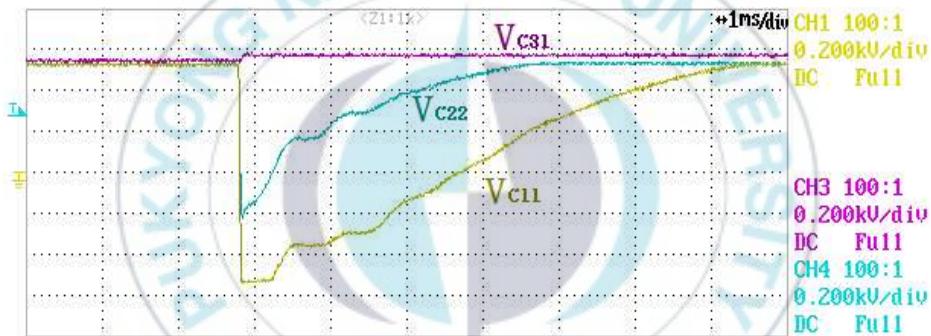


그림 2-34. 재충전 모드에서 V_{C11} , V_{C22} , V_{C31} 실험 파형

그림 2-33은 재충전 모드($t_{13} \sim t_{18}$)에서 전류 커패시터의 전압 V_{C11} , V_{C22} , V_{C31} 의 시뮬레이션 파형이다. 그림 2-34는 그림 2-33의 실험 파형이다. 3상 단락사고가 유지되고 있는 상태에서도 단락 회로와 관계없이 재충전 루프에 의해 전류 커패시터가 재충전되고 있는 것을 확인 할 수 있다.

전류 커패시터의 전압이 재충전될 때 흔들리는 모습을 확인할 수 있는데 그 이유는 계통의 전압이 흔들리기 때문이다. 단락사고가 발생하면 계통은 순간적으로 큰 전력을 공급하게 되므로 계통의 전압이 흔들릴 수 있다. 그림 2-34의 파형은 계통의 전압이 흔들리더라도 재충전되는 것을 확인할 수 있다. 시뮬레이션 결과와 실험 측정 결과가 일치하는 것을 볼 수 있다.

D. 무부하 차단 모드

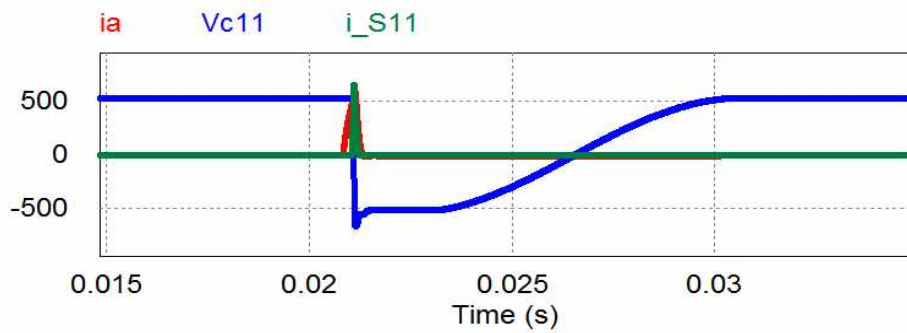


그림 2-35. 무부하 차단 모드에서 V_{C11} , i_a , i_{S11} 파형

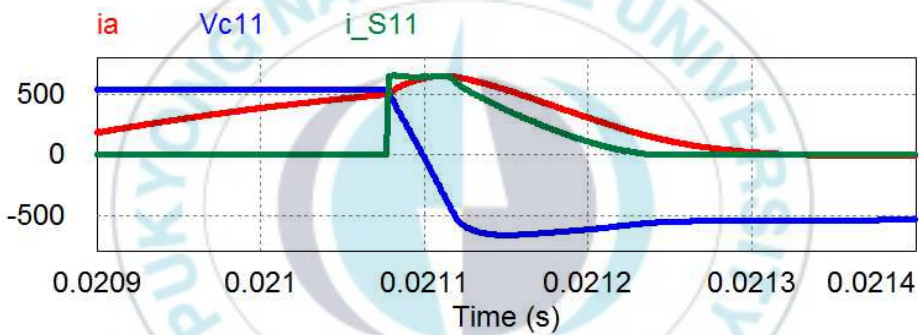


그림 2-36. 무부하 차단 모드에서 V_{C11} , i_a , i_{S11} 확대 파형

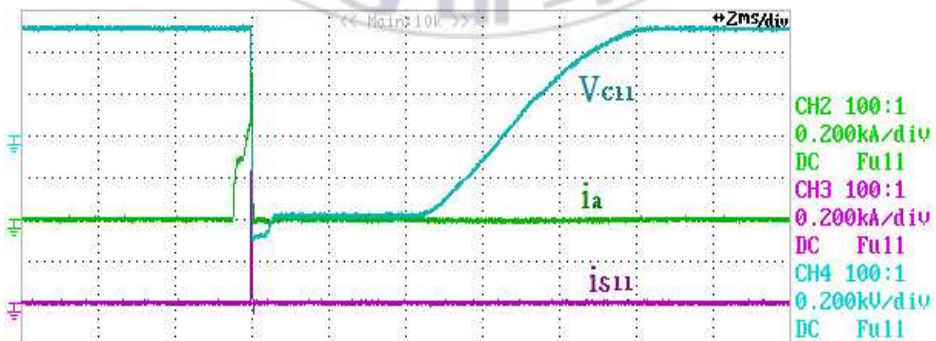


그림 2-37. 무부하 차단 모드에서 V_{C11} , i_a , i_{S11} 파형

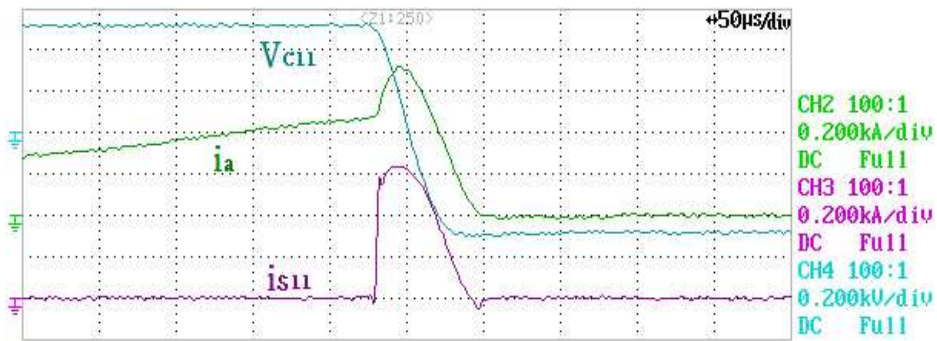


그림 2-38. 무부하 차단 모드에서 V_{C11} , i_a , i_{S11} 확대 파형

그림 2-35는 무부하 차단모드에서 a상에 흐르는 전류 i_a , i_{S11} 와 전류 커패시터 전압 V_{C11} 의 시뮬레이션 파형이고, 그림 2-36은 그림 2-35를 확대한 시뮬레이션 파형이다. 그림 2-37은 그림 2-35의 실험 파형이며, 그림 2-38은 그림 2-36의 실험 파형이다. 차단기가 계통에 최초로 설치되고 LS가 턴온되면 전류 커패시터는 자연 충전된다. 그리고 부하에 전력을 공급하기 위해 차단기의 주 SCR을 턴온할 경우, 만약 계통에 단락사고가 발생해도 제안한 차단기는 차단동작을 수행하는 것을 무부하 차단실험을 통해 알 수 있다.

E. 동작책무

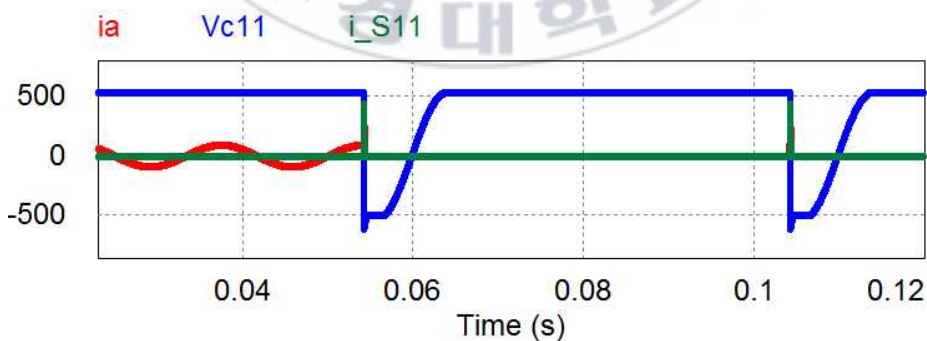


그림 2-39. 재투입 모드와 재차단 모드에서 V_{C11} , i_a , i_{S11} 시뮬레이션 파형

그림 2-39는 재투입모드와 재차단 모드에서의 i_a , i_{S11} , V_{C11} 의 시뮬레이션 파형을 보여준다. 그림 2-40은 그림 2-39의 실험파형이다.

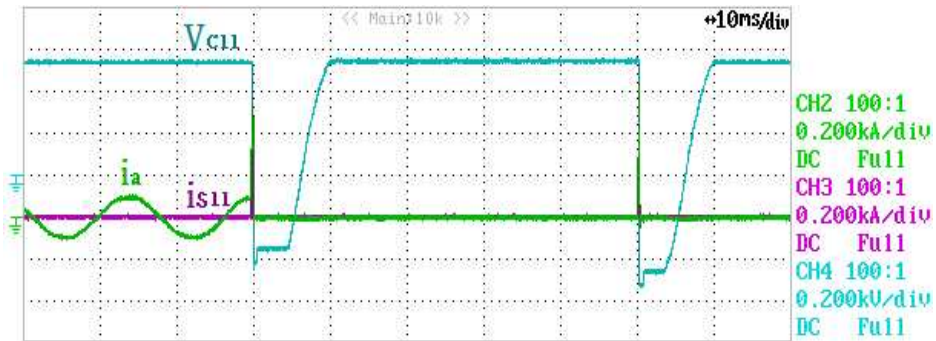


그림 2-40. 재투입 모드와 재차단 모드에서 V_{C11} , i_a , i_{s11} 파형

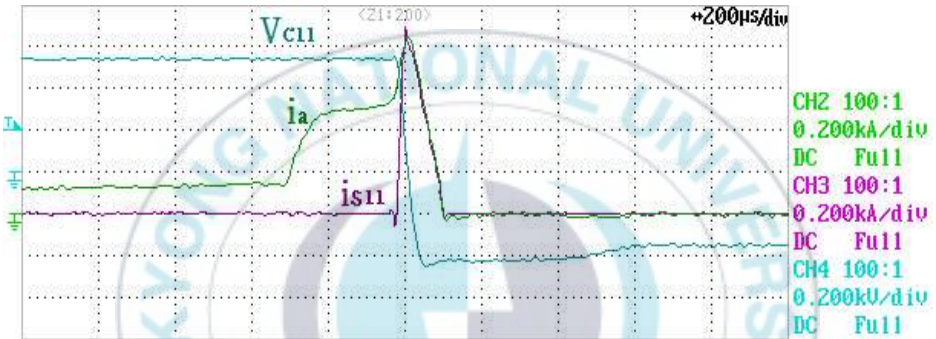


그림 2-41. 재투입 모드와 재차단 모드에서 V_{C11} , i_a , i_{s11} 첫 번째 차단 파형

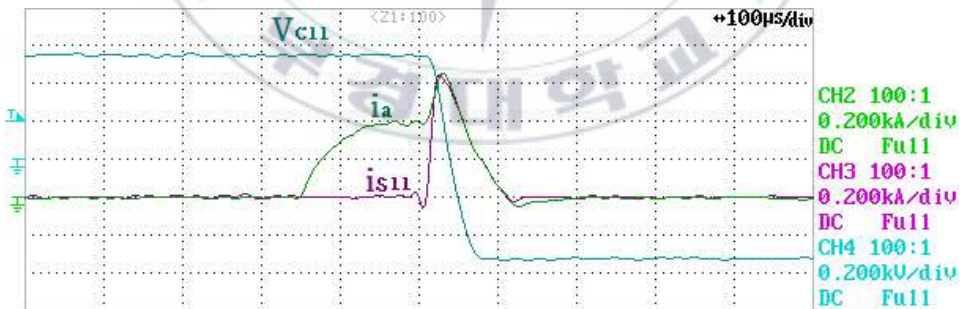


그림 2-42. 재투입 모드와 재차단 모드에서 V_{C11} , i_a , i_{s11} 두 번째 차단 파형

그림 2-41은 그림 2-40의 첫 번째 차단을 확대한 파형이다. 그림 2-42는 그림 2-40의 두 번째 차단을 확대한 파형이다. 제안한 AC SSCB는 동작책무의 재투입과 재차단 동작을 원활하게 수행하는 것을 보여준다.

3. 결 론

이 논문은 많은 추가적인 소자 없이 신속할 차단이 가능하며 재투입과 재차단의 동작책무 수행할 수 있는 새로운 AC SSCB를 제안한다. 최악의 3상 단락 사고 이후라고 하더라도 제안한 AC SSCB는 전류 커패시터를 충전할 수 있고, 부하 단에 사고 상황이 지속되더라도 재투입과 재차단의 동작책무를 수행할 수 있다.

제안한 AC SSCB는 3상 전원의 중성점 접지 방식에 관계없이 적용이 가능하며 모든 전류 커패시터가 자연 충전이 된다. 따라서 전류 커패시터를 충전하기 위한 제어가 요구되지 않으므로 시스템의 제어가 간단하다.

또한, 본 논문에서 제안한 AC SSCB를 쉽게 설계할 수 있도록 설계방법을 제시하였다. 제안한 AC SSCB는 3상 단락 사고를 모의하여 시뮬레이션과 실험을 통해 동작 특성을 검증하였다. 본 논문에서 연구한 AC SSCB는 향후 전력 품질을 위한 시스템의 설계 및 구현에 활용될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Chan-Nan Lu and Cheng-Chieh Shen, "Estimation of Sensitive Equipment Disruptions Due to Voltage Sags," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 22, No. 2, pp. 1132 - 1137, Apr. 2007.
- [2] N. Hatziargyriou, H. Asano, R. Iravani and C. Marnay, "Microgrids," IEEE power & energy magazine, pp.78 - 94, Jul./Aug. 2007.
- [3] F. Katiraei and M.R. Iravani, "Power Management Strategies for a Microgrid with Multiple Distributed Generation Units," IEEE Trans. Power Systems, vol. 21, no. 4, pp.1821 - 1831, Nov. 2006.
- [4] Giuseppe Parise and Luigi Parise, "Unprotected Faults of Electrical and Extension Cords in AC and DC Systems," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 50, No. 1, pp.4 - 9, Jan. 2014.
- [5] C. Abbey, D. Cornforth, N. Hatziargyriou, K. Hirose, A. Kwasinski, E. Kyriakides, G. Platt, L. Reyes and S. Suryanarayanan, "Powering Through the Storm: Microgrids Operation for More Efficient Disaster Recovery," IEEE Power and Energy Magazine, vol. 12, pp. 67 - 76, May/June 2014.
- [6] C37.09, IEEE Standard Test Procedure for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis, 1999
- [7] 김진영, 김슬기, 김인동, 노의철, 김홍근. (2010). 마이크로그리드를 위한 STS와 SSCB에 관한 연구. 대한전기학회 학술대회 논문집, 958-959.
- [8] Z. J. Shen, "Ultrafast Solid-State Circuit Breakers: Protecting Converter-Based ac and dc Microgrids Against Short Circuit Faults [Technology Leaders]," in IEEE Electrification Magazine, vol. 4, no. 2, pp. 72-70, June 2016.
- [9] Eldine, R. Naser, et al. "SMART LOW VOLTAGE AC SOLID STATE CIRCUIT BREAKERS FOR SMART GRIDS." Global Journal of Advanced Engineering Technologies 2.3 - 2013 (2013).
- [10] C. Meyer, S. Schroder and R. W. De Doncker, "Solid-State circuit breakers and current limiters for medium-voltage systems having distributed power systems," IEEE Trans. Power Electron., vol. 19, no. 5, pp. 1333 - 1340, Sep. 2004.

- [11] C. Meyer and R. W. De Doncker, "Solid-State Circuit Breaker Based on Active Thyristor Topologies," IEEE Trans. Power Electronics, vol. 21, No. 2, pp. 450 - 458, Mar. 2006.
- [12] Jin-young Kim, Seung-soo Choi, In-dong Kim, "A novel reclosing and rebreaking AC thyristor circuit breaker," Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia), 2015 9th International, pp. 2574-2581, June 2015.
- [13] Jin-Young Kim, Seung-Soo Choi, and In-Dong Kim. "A Novel AC Solid-State Circuit Breaker with Reclosing and Rebreaking Capability." Journal of Power Electronics (JPE) 15.4 (2015): 1074-1084.



감사의 글

저는 대학교 3학년 2학기에 처음 전력전자 수업을 들었습니다. 그 때까지 저는 제가 해석하지 못하는 회로는 없다는 자만심에 가득 차있었습니다. 하지만 전력전자 수업을 들으면서 제가 우물 안 개구리였다는 사실을 깨달았습니다. 그렇게 전력전자라는 과목에 흥미를 느끼게 되었고, 결정적으로 캡스톤 디자인 수업을 하면서 전력전자를 더 공부해보고 싶다는 마음이 생겼습니다.

캡스톤 디자인 수업에서 저는 무효전력 보상장치를 공부, 설계, 제작, 실험했습니다. 그렇게 1년 동안 열심히 무효전력 보상장치를 공부하면서 제가 알고 있는 전력전자는 빙산의 일각이라는 것을 깨닫고 대학원에 진학하게 되었습니다.

대학원에 진학하고 전력전자에 관해 궁금하거나 모르는 것은 김인동 교수님께 여쭙봤었는데 그 때마다 교수님께서서는 아무리 바빠서도 항상 친절하게 제가 이해할 때까지 차근차근 설명해주셨습니다. 그리고 석사과정임에도 불구하고 중국에서 열리는 국제학회에 발표할 수 있는 기회도 주시는 등 저를 배려해주시는 교수님과 선배님들의 도움에 감사합니다. 김인동 교수님 실험실에 들어 간 것은 제 인생에서 최고의 선택이었다고 생각합니다.

대학원 수업에서 공학도의 자세와 전력전자에 대해 많은 것을 알려주시고 학생들을 위해 항상 헌신하시는 노의철 교수님, 석사졸업논문에 도움을 주시고 힘내라고 격려해주신 박창현 교수님 정말 감사합니다.

대학원 진학하는데 전적으로 저를 믿어주신 아버지와 열심히 하라고 격려해주신 어머니, 집안 걱정은 하지 말라고 저를 위로해준 형에게 진심으로 감사인사를 드립니다.

제가 실험을 할 때 하나하나 알려주시고 전공에 관해 심도 있는 토론을 해주신 김진영 선배님, 제가 특히 못하는 영어를 도와주시고 조언을 해주시는 최승수 선배님, 항상 부지런한 모습으로 제가 나태해질 때마다 저를 깨워쳐주신 김학수 선배님, 여러 가지 프로그램을 사용해서 다양하게 저에게 많은 도움을 주신 이창우 형, 힘든 일이 있을 때마다 제게 위로를 해주고 격려를 해

주는 배려심 깊은 이재운 형, 전공에 관해서 토론하고 서로 궁금한 것을 물어볼 수 있는 박권식, 서병준, 실험실 굳은 일은 도맡아가며 실험에 도움을 준 후배 이상화, 묵묵하게 일하며 힘든 내색한번 안하는 착한 후배 유진열, 특유의 귀여움으로 모두에게 사랑을 받는 후배 조광래, 항상 웃으면서 만나는 모든 사람을 행복하게 해주는 후배 최희창등 모두에게 감사합니다.

아무것도 모르는 저에게 전공에 흥미를 느끼게 해준 JINE 동아리와 JINE에서 알게 된 후배 고무석과 JINE 선배님들, 후배님들께 감사드립니다.

끝으로 이렇게 많은 분들의 도움덕분에 제가 석사졸업논문을 쓰고 무사히 졸업을 할 수 있게 되었습니다. 정말 진심으로 감사드립니다.



2017년 6월
송승민 올림