



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](#)

공학석사학위논문

계통사고 발생시 **STS** 차단시간  
최소화 기법



2011년 2월

부경대학교 대학원

전기공학과

**SUN RUI**

공학석사 학위논문

# 계통사고 발생시 **STS** 차단시간 최소화 기법

지도교수 노의철

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.



2011년 2월

부경대학교 대학원

전기공학과

SUN RUI

# SUN RUI의 공학석사 학위논문을 인준함

2011년 2월 25일



주 심 공학박사 김 인 동 (인)

위 원 공학박사 김 영 학 (인)

위 원 공학박사 노 의 철 (인)

# 목 차

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 그림목차 .....                           | ii |
| 표 목 차 .....                          | iv |
| <br>                                 |    |
| Abstract .....                       | v  |
| <br>                                 |    |
| 1. 서 론 .....                         | 1  |
| <br>                                 |    |
| 2. STS 차단시간 최소화 기법 .....             | 5  |
| 2.1 시스템 구성도 .....                    | 5  |
| 2.2 계통 사고 발생 시 모드 전환 문제 .....        | 7  |
| 2.3 STS 차단시간 최소화 기법 .....            | 10 |
| <br>                                 |    |
| 3. STS 사고전류 특성분석 .....               | 14 |
| 3.1 PCS와 계통간의 전력 흐름에 따른 특성 분석 .....  | 15 |
| 3.2 PCS가 계통에 공급하는 전력량에 따른 사고전류 특성 .. | 21 |
| 3.3 사고 발생 시점에 따른 사고전류 특성 .....       | 28 |
| 3.4 STS 차단시간 분석 .....                | 35 |
| <br>                                 |    |
| 4. 결 론 .....                         | 40 |
| <br>                                 |    |
| 참 고 문 헌 .....                        | 41 |
| <br>                                 |    |
| 감사의 글 .....                          | 42 |

# 그림 목 차

|   |    |
|---|----|
| 그림 1-1. 마이크로그리드 구성의 일례 .....                                | 2  |
| 그림 2-1. 시스템 구성도 .....                                       | 5  |
| 그림 2-2. 계통 측 단락에 의한 정전 발생 시 인버터<br>전류와 사고전류 파형 .....        | 8  |
| 그림 2-3. 계통 측 단락에 의한 정전 발생 시 부하<br>전압 및 전류 파형 .....          | 9  |
| 그림 2-4. STS 차단시간 최소화 기법 설명을 위한 b상 증가회로 .....                | 10 |
| 그림 2-5. 사고발생 시 인버터전류와 STS 사고전류 파형 .....                     | 12 |
| 그림 2-6. 사고발생 시 부하전압 및 전류파형 .....                            | 12 |
| 그림 3-1. 간략화한 시스템 구성도 .....                                  | 15 |
| 그림 3-2. PCS와 STS의 전류 파형 (PCS→부하+계통) .....                   | 18 |
| 그림 3-3. 부하의 전류 및 전압 파형 (PCS→부하+계통) .....                    | 18 |
| 그림 3-4. PCS와 STS의 전류 파형 (PCS+계통→부하) .....                   | 19 |
| 그림 3-5. 부하의 전류 및 전압 파형 (PCS+계통→부하) .....                    | 19 |
| 그림 3-6. PCS가 부하에 0 [kVA], 계통에 10 [kW]의<br>전력을 공급하는 경우 ..... | 24 |
| 그림 3-7. PCS가 부하에 2 [kVA], 계통에 8 [kW]의<br>전력을 공급하는 경우 .....  | 24 |
| 그림 3-8. PCS가 부하에 4 [kVA], 계통에 6 [kW]의<br>전력을 공급하는 경우 .....  | 25 |
| 그림 3-9. PCS가 부하에 6 [kVA], 계통에 4 [kW]의<br>전력을 공급하는 경우 .....  | 25 |
| 그림 3-10. PCS가 부하에 8 [kVA], 계통에 2 [kW]의<br>전력을 공급하는 경우 ..... | 26 |
| 그림 3-11. PCS가 부하에 10 [kVA], 계통에 0 [kW]의                     |    |

|   |    |
|---|----|
| 전력을 공급하는 경우 .....   | 26 |
| 그림 3-12. STS의 사고전류를 10 [kVA]의 정격 전류로<br>정규화한 그래프 .....                | 27 |
| 그림 3-13. 3상 대칭 전원의 각 상 전압 파형 .....                                    | 28 |
| 그림 3-14. 사고 발생 시점이 $V_a$ 전압 $0^\circ$ 인 경우<br>STS의 사고전류 파형 .....      | 30 |
| 그림 3-15. 사고 발생 시점이 $V_a$ 전압 $10^\circ$ 인 경우<br>STS의 사고전류 파형 .....     | 30 |
| 그림 3-16. 사고 발생 시점이 $V_a$ 전압 $20^\circ$ 인 경우<br>STS의 사고전류 파형 .....     | 31 |
| 그림 3-17. 사고 발생 시점이 $V_a$ 전압 $30^\circ$ 인 경우<br>STS의 사고전류 파형 .....     | 31 |
| 그림 3-18. 사고 발생 시점이 $V_a$ 전압 $40^\circ$ 인 경우<br>STS의 사고전류 파형 .....     | 32 |
| 그림 3-19. 사고 발생 시점이 $V_a$ 전압 $50^\circ$ 인 경우<br>STS의 사고전류 파형 .....     | 32 |
| 그림 3-20. 사고 발생 시점이 $V_a$ 전압 $60^\circ$ 인 경우<br>STS의 사고전류 파형 .....     | 33 |
| 그림 3-21. 사고 발생 시점에 따른 사고전류의 크기 .....                                  | 34 |
| 그림 3-22. $V_a$ 의 위상이 $0^\circ$ 에서 사고 발생 시 $T_{sts\_turn\ off}$ .....  | 36 |
| 그림 3-23. $V_a$ 의 위상이 $10^\circ$ 에서 사고 발생 시 $T_{sts\_turn\ off}$ ..... | 36 |
| 그림 3-24. $V_a$ 의 위상이 $20^\circ$ 에서 사고 발생 시 $T_{sts\_turn\ off}$ ..... | 37 |
| 그림 3-25. $V_a$ 의 위상이 $30^\circ$ 에서 사고 발생 시 $T_{sts\_turn\ off}$ ..... | 37 |
| 그림 3-26. $V_a$ 의 위상이 $40^\circ$ 에서 사고 발생 시 $T_{sts\_turn\ off}$ ..... | 38 |
| 그림 3-27. $V_a$ 의 위상이 $50^\circ$ 에서 사고 발생 시 $T_{sts\_turn\ off}$ ..... | 38 |
| 그림 3-28. STS의 차단시간 특성 그래프 .....                                       | 39 |

# 표 목 차

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 표 2-1. 시스템 파라미터 .....           | 6  |
| 표 3-1. 시뮬레이션을 위한 시스템 파라미터 ..... | 14 |
| 표 3-2. 부하 용량별 R-L 소자 값 .....    | 22 |



# Minimization of STS Breaking Time at Utility Side Fault

SUN RUI

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

## **Abstract**

This paper describes a method of STS (Static Transfer Switch) fault current minimization for a microgrid. Usually, a microgrid is consisted with micro sources such as fuel cell, solar cell, wind power, and micro turbine and energy storage system. The microgrid is connected to the utility grid through STS, and the most common STS is consisted with anti parallel connected SCR thyristors.

In case of utility side fault the microgrid should be disconnected from the utility grid by the STS, and the microgrid operation change to islanding mode. However, it is very difficult to change the operating mode from grid connection to islanding, because of the SCR thyristor turn off characteristics. It is impossible to turn off the SCR thyristor with gate signal.

Therefore, the maximum turn off time of the SCR thyristor may be 8.3 [ms] of the half cycle of 60 [Hz]. This mean that the microgrid can not be disconnected form the utility grid for several [ms] at the fault occurrence. That results in huge STS fault current and severe power quality problem in a microgrid.

A fact turn off method for the STS is proposed in this paper. The proposed method is applied to 10 [kVA] system including a PCS(Power Conditioning System) for micro source, 3-phase R-L load, STS, and utility source. STS turn off characteristics is analysed. With the variation of load power, power flow direction, and PCS output power.

Simulation results show that the maximum turn off time of the STS with the proposed method is 490 [us], that is almost 6% of 8.3 [ms], which is dramatically reduce value compared with that of the conventional method.

It is expected that the proposed method can be applied to a microgrid control system for the STS fault current minimization and seamless transfer of a PCS form current mode to voltage mode operation, therefore, can contribute to a high power quality microgrid implementation.

# 1. 서 론

최근에 화석연료 고갈 및 환경오염 문제를 해결하고자 신재생에너지 (풍력, 조력, 태양광 등)에 대한 관심이 급증하고 있으며 전 세계적으로 풍력과 태양광을 이용한 발전단지가 그 경제성에 힘입어 급속도로 확대되고 있다. 이러한 신재생에너지의 사용과 더불어 연료전지, 마이크로터빈 등의 분산전원들을 하나의 시스템으로 구성한 마이크로그리드에 대한 연구개발도 활발히 진행되고 있다.<sup>[1]</sup> 마이크로그리드는 다양한 종류의 분산전원들과 부하를 포함하고 있으며 상용계통에 연계되어 운전하기도 하고, 상용계통에 사고 발생 시에는 계통과 분리되어 독립운전도 가능하게 함으로서 에너지 이용효율을 극대화하고 전력품질을 최대화하는 특징을 갖는다.<sup>[2]</sup> 마이크로그리드 내의 부하는 일반부하, 차단 가능한 부하, 민감 부하 군으로 분류하여 관리하며 계통연계 운전 중 계통사고 발생 시 독립운전 모드로 전환될 때 마이크로그리드에서 발전되는 전력용량 부족 시 차단 가능한 부하는 차단하도록 한다.

문제는 컴퓨터, 자동화기기, 로봇 등과 같은 민감 부하에 인가되는 전력의 품질이 중요한데 마이크로그리드를 계통으로부터 분리할 때 양질의 전력품질을 유지하는 것이 매우 중요하다. 이들 민감 부하는 마이크로그리드의 계통연계운전이든 독립운전이든 관계없이 항상 양질의 전력을 필요로 하기 때문이다. 그림 1-1은 마이크로그리드 구성의 일례를 나타낸다. 그림 1-1의 마이크로그리드를 구성하는 마이크로 소스로는 연료전지 (Fuel Cell), 태양전지, 풍력, 배터리, 슈퍼커패시터가 있으며 각각의 소스는 DC/DC, DC/AC 전력변환기로 구성되는 PCS (Power

Conditioning System)를 통하여 그리드에 접속된다. 마이크로그리드를 계통에 연결하거나 차단할 때 또는 부하급변이나 마이크로소스의 발전량 급변 시 등에 대비하여 마이크로그리드의 전력품질을 확보하기 위한 에너지 저장장치가 필수인데 그림 1-1에서는 배터리와 슈퍼커패시터가 이러한 역할을 하고 있다.<sup>[3]</sup> 특히 슈퍼커패시터는 응답특성이 매우 우수하여 전력급변에 대응하여 마이크로그리드의 전력품질을 높이는데 중요한 역할을 한다. 그림 1-1의 좌측상단에 STS (Static Transfer Switch)가 있는데 STS는 통상 SCR 사이리스터로 구성되며 계통연계 또는 독립 운전 시 상용계통과의 접속 및 차단 기능을 한다.

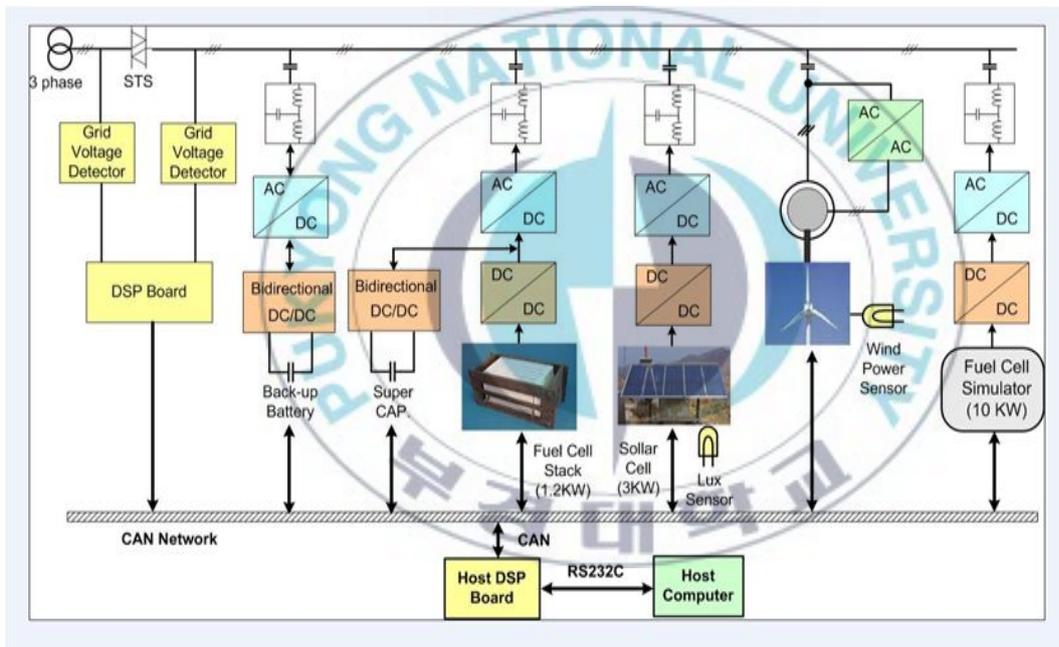


그림 1-1 마이크로그리드 구성의 일례

상용계통에서 사고가 발생하면 STS를 이용해서 마이크로그리드를 계통으로부터 분리하여 독립운전 모드로 전환한다. 그러나 STS는 SCR 사이리스터로 구성되어 있기 때문에 순간적으로 턴 오프 되지 못하고 소자에 흐르던 전류가 영으로 될 때 차단이 가능해진다는 문제가 있다.<sup>[4],[5]</sup> 이것은 계통에 사고 발생시 PCS는 PCC (Point of Common Coupling)를 기준으로 전압모드로 전환하여 제어하려 하지만 사고 발생 직후 STS가 완전히 턴 오프 되지 못하여 PCC점이 사고 발생전압으로 고정되어 있기 때문에 PCS의 전압모드가 제어되지 않는 문제를 유발한다. 최악의 경우에 계통 측 순간정전 사고 발생시 PCC점이 영 전압이 되어 STS가 완전히 턴 오프 되기 전까지 PCC점의 전압이 영 전압이 되기 때문에 인버터가 풀 듀티로 제어되어 고장발생 시 STS가 턴 오프 되기 전까지 인버터가 최대 전압을 발생하고 큰 사고전류가 흐르게 된다. 또한 고장발생 시점에서 계통과 PCS간의 전력흐름, 부하의 크기에 따라 STS의 차단시간 특성은 변하게 되며 최악의 경우 계통주파수의 한 사이클인 16.6 [ms] 동안 사고전류가 유지되어 STS가 턴 오프 되지 않게 된다. 이 시간 동안 마이크로그리드의 전원은 제어 불가능한 상태이며 부하에 공급되는 전력에 심각한 외란이 발생하게 되고, 특히 민감 부하인 경우에는 치명적인 손상을 입히게 되는 요인이 된다.<sup>[6]</sup>

본 논문에서는 계통사고 발생시 STS에 흐르는 사고전류를 신속히 제거하여 STS의 턴 오프를 최단시간에 이루어지도록 하고 이를 통하여 PCS의 전류모드에서 전압모드로의 전환이 안정적으로 이루어질 수 있도록 하는 STS 차단시간 최소화 기법을 제안한다.

제안하는 STS 차단시간 최소화 기법은 사고발생시 PCC점을 기준으로 PCS와 계통의 순시전력 흐름의 관점에서 PCS의 발생전압을 제어

하여 STS에 흐르는 사고전류를 신속히 제거하게 된다. 이를 통하여 PCS의 전류모드에서 전압모드로 전환이 신속하고 안정적으로 이루어지며 부하에 공급되는 전력에 외란을 최소화 하게 한다.

본 논문에서는 해석의 편의상 그림 1-1의 마이크로 소스 중에서 전류 모드와 전압 모드 동작을 갖는 하나의 PCS를 대상으로 하며 PCS의 용량은 약 10 [kVA]로 하였다. 시뮬레이션을 통하여 본 논문에서 제안하는 방법의 타당성을 입증하였으며 계통의 사고발생 시점과 부하에서 소비하는 전력 및 PCS와 계통의 전력흐름을 종합적으로 고려하여 STS에 흐르는 사고전류의 크기 및 차단시간 특성을 분석하였다.



## 2. STS 차단시간 최소화 기법

### 2.1 시스템 구성도

그림 2-1은 본 논문에서 제안한 방법을 검증하기 위해 사용한 시스템 구성도이다. 시스템은 하나의 계통연계형 PCS와 3상 R-L 부하, 계통과 STS로 구성된다. 그림 2-1에 나타낸 각 소자의 파라미터는 표 2-1에 나타내었다.

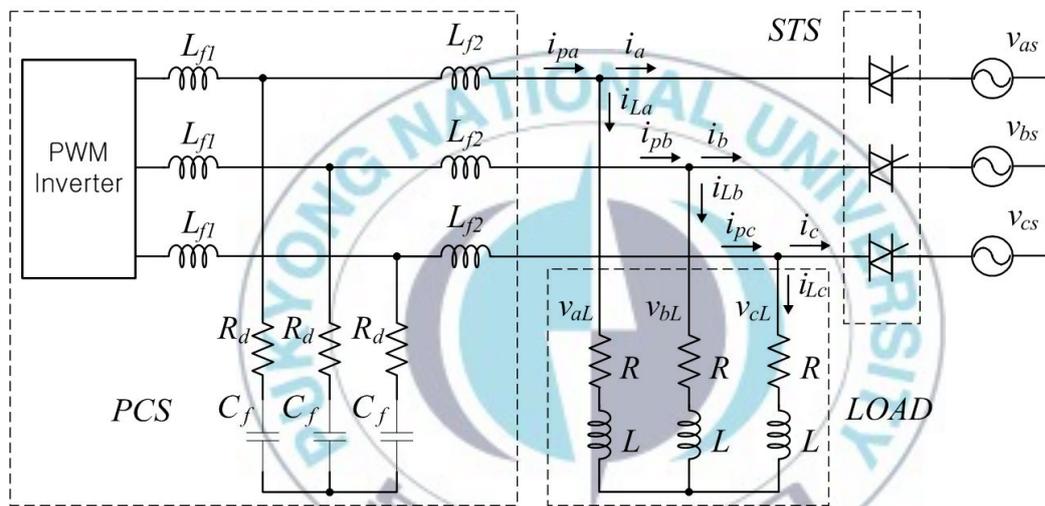


그림 2-1 시스템 구성도

계통 연계형 PCS는 10 [kVA]로 가정하였으며, LCL 필터는 PCS의 용량에 맞추어 10 [kVA]를 기준으로 설계하였다. 부하는 10 [kVA]의 R-L 부하로 가정하였다. 계통 사고 발생 시 사고전류의 크기를 알아보기 위하여 PCS의 DC-link 전압과 계통은 이상적인 전압원으로 가정하였다. 일반적으로 실제의 PCS는 정격전류의 약 120 [%]의 전류가 흐

르게 되면 운전을 정지하게 되는데 이점은 고려하지 않았다.

표 1-1 시스템 파라미터<sup>[7],[8]</sup>

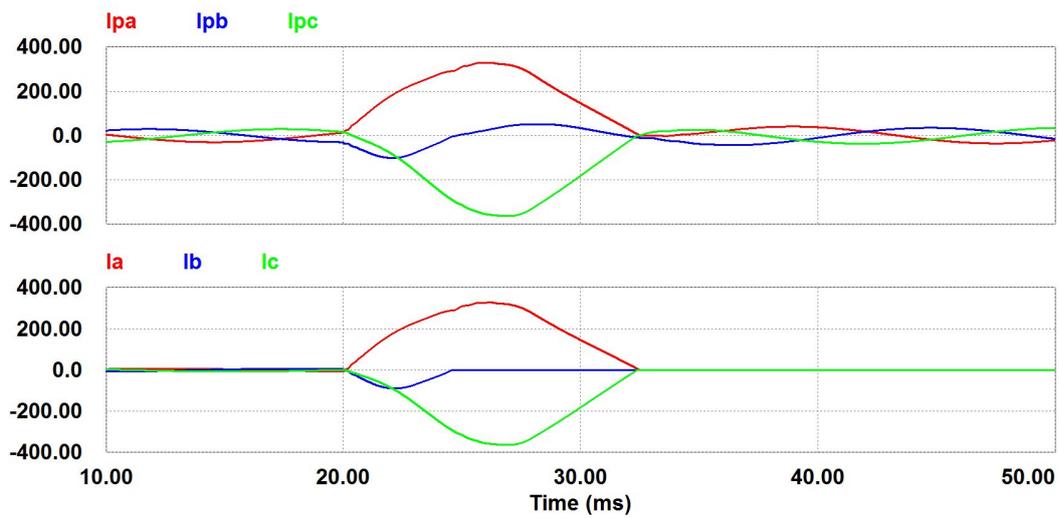
| 파라미터        | 값                       |
|-------------|-------------------------|
| $V_{as-cs}$ | 127 [V <sub>rms</sub> ] |
| $L_{f1}$    | 2 [mH]                  |
| $L_{f2}$    | 1 [mH]                  |
| $R_d$       | 4.1 [ $\Omega$ ]        |
| $C_f$       | 4.1 [ $\mu$ F]          |
| $R$         | 4.12 [ $\Omega$ ]       |
| $L$         | 6.77 [mH]               |



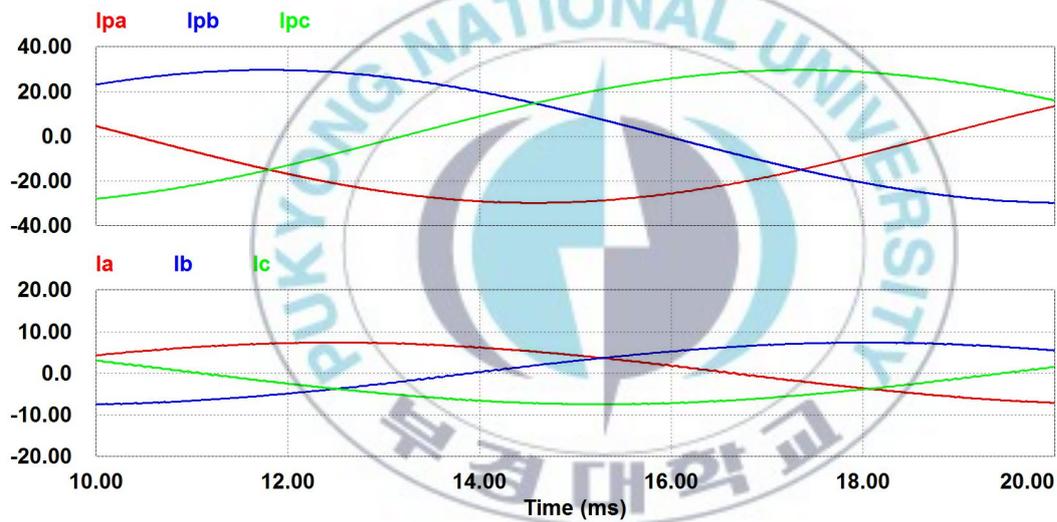
## 2.2 계통 사고 발생 시 모드 전환 문제

그림 2-1의 시스템에 대하여 계통에서 사고가 발생하였을 경우 발생하는 문제점을 살펴보고자 한다. 그림 2-1에서 계통연계형 PCS가 부하에 8 [kVA]의 전력을 공급하고 있다고 가정한다. 이러한 상황에서 계통 측에 사고가 발생하였다고 가정한다. 즉, 그림 2-1에서 STS 우측에 계통 측 단락사고가 발생하며 정전이 된 경우를 고려한다. 사고 발생 신호는 50 [us]후에 PCS와 STS로 전달되며 사고 발생 신호를 전달 받는 순간 PCS는 전류모드에서 전압모드로 전환되며 STS에는 턴오프 신호가 전달된다.

이러한 모드 전환 방법으로 제어하는 시스템에서 그림 2-2는 이러한 사고가 발생하였을 경우의 PCS 출력전류 ( $i_{pa}$ ,  $i_{pb}$ ,  $i_{pc}$ )와 계통 측 전류 ( $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$ )를 나타내며, 그림 2-2(b)에 그림 2-2(a)의 정상상태일 때 전류파형을 확대하여 나타내었다. 20 [ms] 이전에는 정상상태로서 PCS 출력전류와 계통 측 전류는 각각 29.7 [A], 7.4 [A] 이다. 계통 측 사고가 20 [ms] 시점에 발생하였다고 가정한 경우인데 20 [ms] 이후의 PCS 출력전류와 계통 측 사고전류의 크기는  $i_{pc}$ ,  $i_c$ 가 각각 -363 [A], -363 [A]로서 정상상태 전류의 12.2배, 49배에 달하는 심각한 고장전류임을 알 수 있다. 그림 2-3은 단락사고 발생 시 부하 측 전압과 전류 파형을 나타낸다.



(a)



(b)

그림 2-2 계통 측 단락에 의한 정전 발생 시 인버터전류와 사고전류 파형

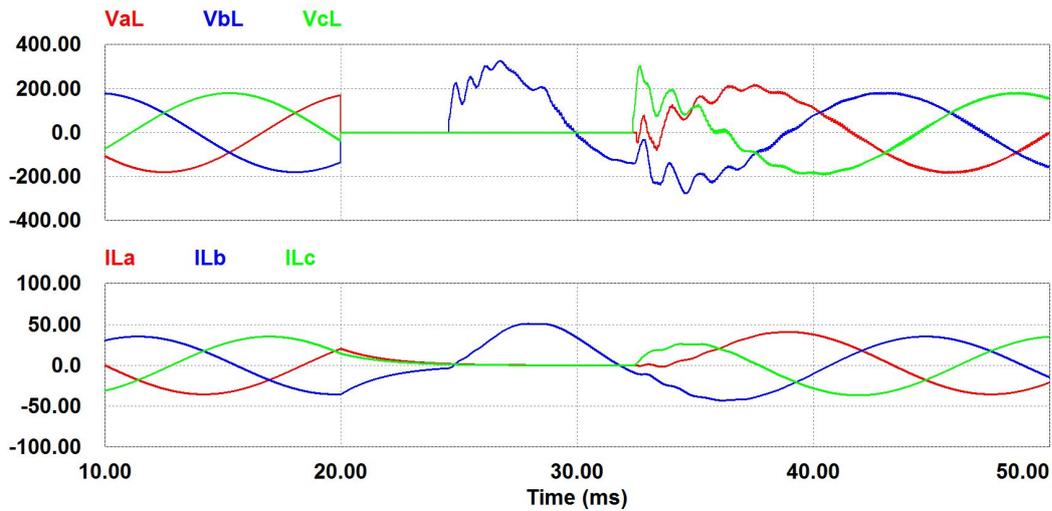


그림 2-3 계통 측 단락에 의한 정전 발생 시 부하 전압 및 전류 파형

사고 발생 후 50 [us] 시점에서 사고발생 신호가 PCS와 STS에 전달 되면 PCS는 전압 모드로 즉시 전환된다. 하지만 그림 2-2에 나타난 것과 같이 STS에 흐르는 전류가 영 전류가 되지 못해 STS가 턴 오프 되지 못하고 이 시간동안 PCC점의 전압은 영 전압이 되게 된다. 이로 인하여 전압모드로 운전하는 PCS는 영 전압을 피드백 받아 풀 듀티로 인버터를 제어하게 되며 STS가 완전히 턴 오프 되기 전 까지 STS에 흐르는 사고전류는 정상 상태 전류의 수 ~ 수십 배까지 증가하게 되며 사고 전류의 크기는 PCS와 계통사이에 연결된 인터페이스 인덕터  $L_{f2}$ 의 크기에 의해 결정된다.

실제의 PCS에서는 사고전류를 PCS 정격전류의 120 [%] 정도로 설정하게 되는데 위와 같은 큰 사고전류가 발생 시 PCS는 동작이 정지되며 그리드 내에 있는 민감 부하에 공급되는 전력 또한 공급이 중단 되는 상황에 처하게 된다.

### 2.3 STS 차단시간 최소화 기법

계통사고가 발생한 경우 PCS의 모드 전환에서 발생하는 문제는 STS에 흐르는 전류가 영 전류가 되지 않아 STS의 턴 오프 시간이 지연되어 전압 모드로 전환한 PCS의 제어가 불안정하게 되기 때문에 발생한다. 이 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 STS의 차단시간 최소화 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 사고 발생 시 PCS의 신속한 모드 전환 이전에 STS에 흐르는 사고 전류를 먼저 차단하여 STS를 신속히 턴 오프 시킨 상태에서 전압 모드로 전환하기 때문에 전압모드로 운전하는 PCS의 제어 안정도를 향상시켰다. 그림 2-4는 본 논문에서 제안하는 STS 차단시간 최소화 기법을 설명하기 위한 b상 등가회로이다.

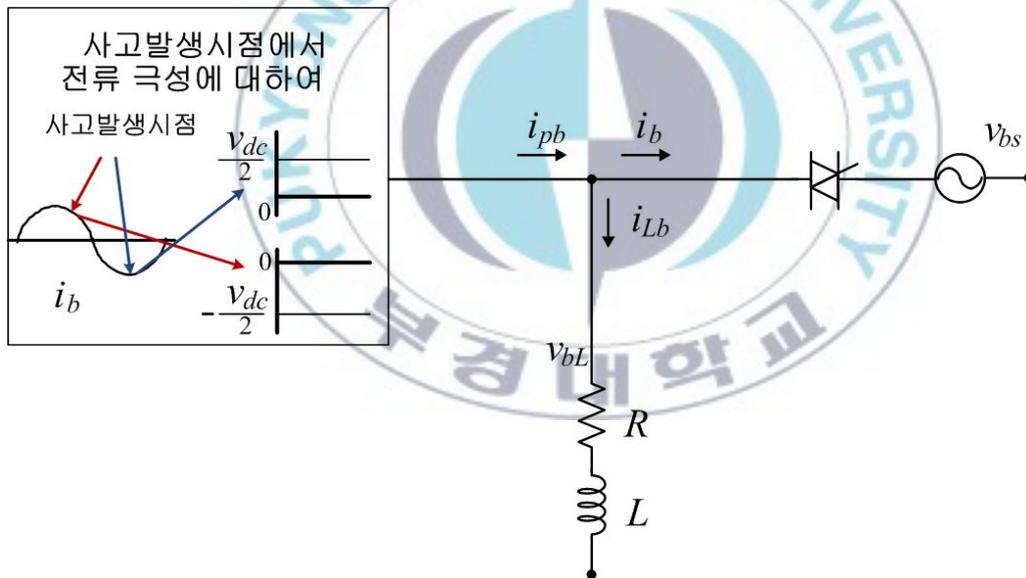


그림 2-4 STS 차단시간 최소화 기법 설명을 위한 b상 등가회로

제안하는 STS 차단시간 최소화 기법은 사고 발생 시점에서 인버터의 발생 전압을 계통으로 흐르는 전류의 극성과 반대의 극성이 되도록 발생시킴으로서 STS에 흐르는 전류를 신속하게 영 전류로 만들게 된다. 다시 말해 그림 2-4에 나타낸 것처럼 사고 발생 순간  $i_b$ 의 극성이 양 (+)이면 PCS의 발생전압을 음 ( $-\frac{V_{DC}}{2}$ )으로 제어하며, 반대로 사고 발생 순간  $i_b$ 의 극성이 음 (-)이라면 PCS의 발생전압을 양 ( $\frac{V_{DC}}{2}$ )으로 제어하여 STS에 흐르는 전류를 신속하게 영 전류로 만드는 방법이다. 이 방법으로 3상을 독립적으로 제어하여 각 상의 STS가 모두 턴 오프 된 후 전압 모드로 전환하면 부하에 공급하는 전력의 외란 발생 시간을 최소화 할 수 있다.

그림 2-5와 2-6은 2.2절에서 수행한 시뮬레이션의 조건과 동일한 조건에서 제안한 방법을 이용하여 시뮬레이션 한 결과 파형이다.



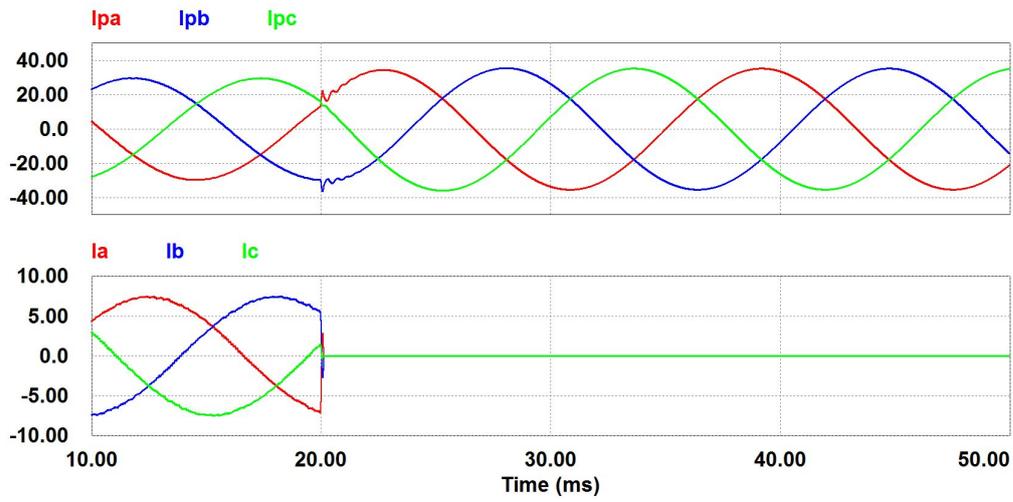


그림 2-5 사고발생 시 인버터전류와 STS 사고전류 파형

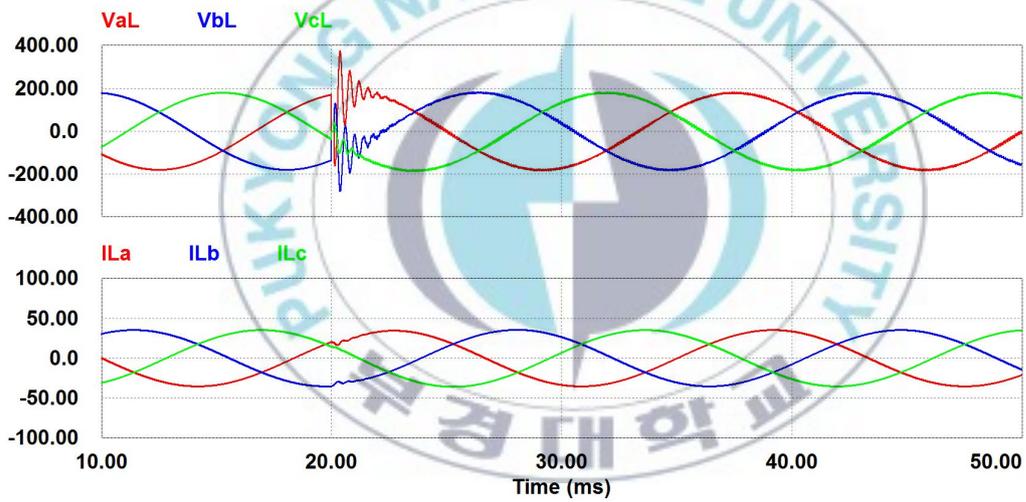


그림 2-6 사고발생 시 부하 전압 및 전류파형

그림 2-5에 나타난 것과 같이 STS에 흐르는 사고 전류 ( $i_a$ ,  $i_b$  및  $i_c$ )가 그림 2-2에 나타난 STS의 사고 전류 파형과는 다르게 신속하게 영전류로 감소하는 것을 알 수 있으며 이로 인하여 STS의 턴 오프 시간이 단축되어 PCS의 전압 모드 전환 시 부하에 공급하는 전력이 빠르게 정상상태가 되는 것을 알 수 있다. 부하전압에 외란이 발생하는 시간은 사고 발생 시점에서 STS가 완전히 턴 오프 되는 시간과 STS가 완전히 턴 오프 된 후 PCS의 전압 모드 동작의 과도 상태시간을 합한 시간으로 제안한 방법을 이용하면 약 2.5 [ms]인 것을 그림 2-5를 통해 알 수 있으며 그림 2-3에서 확인한 18 [ms]의 1/7정도로 외란이 발생하는 시간이 크게 줄어든 것을 알 수 있다.

그림 2-6은 사고발생시 부하 측 전압과 전류파형을 나타내는데 그림 2-3과 비교하며 부하에 공급되는 전력의 순간정전 현상이 거의 발생하지 않으며 1/4 사이클 이내에 부하단 전압이 안정화됨을 알 수 있다. 아울러 부하전류는 거의 정현파를 유지함으로써 전력품질이 상당히 개선되었음을 알 수 있다.

### 3. STS 사고전류 특성분석

본 논문에서 제안하는 STS 차단시간 최소화 기법의 타당성을 시뮬레이션을 통하여 입증하였다. 일반적으로 계통에 사고가 발생 하였을 시 STS에 흐르는 고장 전류는 사고 발생 시점, 부하의 크기 및 계통연계형 PCS와 계통간의 전력흐름에 따라 그 크기가 달라진다. 이러한 이유로 본 논문에서는 사고 발생 시의 조건에 따른 STS에 흐르는 사고 전류의 특성을 분석하고자 한다. 먼저 PCS와 계통간의 전력 흐름에 대한 시뮬레이션을 통하여 사고전류 특성을 분석하고, 다음으로 전력의 양에 따른 사고전류의 특성을 분석한다. 마지막으로 사고 시점에 관한 사고 전류의 특성을 분석하고, 모든 상황을 종합하여 본 논문에서 제안한 STS 차단시간 최소화 기법을 사용하였을 시 가장 큰 사고 전류가 발생하는 사고 조건을 예측하고자 한다. 시뮬레이션을 위한 시스템 파라미터는 표 3-1과 같이 설정하였다. 사고 발생 조건은 2.2절의 시뮬레이션 조건과 동일하다고 가정하였다.

표 2-1 시뮬레이션을 위한 시스템 파라미터

| 파라미터        | 값                       |
|-------------|-------------------------|
| $V_{as-cs}$ | 127 [V <sub>rms</sub> ] |
| $L_{f1}$    | 2 [mH]                  |
| $L_{f2}$    | 1 [mH]                  |
| $R_d$       | 4.1 [ $\Omega$ ]        |
| $C_f$       | 4.1 [ $\mu$ F]          |

### 3.1 PCS와 계통간의 전력 흐름에 따른 특성 분석

그림 3-1은 PCS와 계통간의 전력 흐름에 대한 조건을 설명하기 위해 그림 2-1을 간략화 한 시스템 구성도이다.

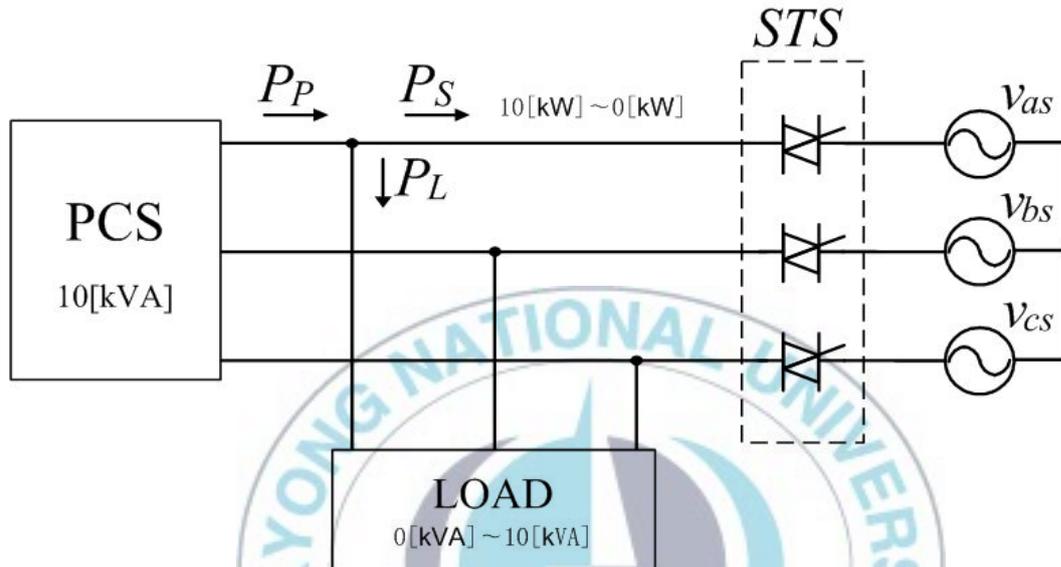


그림 3-1 간략화한 시스템 구성도

먼저 PCS에서 부하와 계통으로 전력을 공급하는 경우와 PCS와 계통에서 부하로 전력을 공급하는 경우를 비교하였다. 이를 수식으로 설명하면 다음 식

$$P_P = P_S + P_L \quad (3-1)$$

$$P_P + P_S = P_L \quad (3-2)$$

으로 표현할 수 있다. 일반적으로 태양광과 풍력과 같은 신재생에너지원은 MPPT (Maximum Power Point Tracking) 방법으로 제어되며 부하의 크기와는 무관하게 에너지원으로부터 발생 가능한 최대 전력이 PCS의 출력으로 발생하도록 제어된다. 10 [kVA]의 정격으로 설계된 태양광 및 풍력 발전용 PCS의 발생 가능한 전력은 설계에 따라 다르지만 이론적인 경우 0 ~ 10 [kVA]의 출력 범위를 가지게 된다. 식 (3-1)은 PCS가 부하와 계통으로 전력을 공급하는 경우를 나타내는 것으로 태양광이나 풍력 발전이 가장 좋은 조건에서 10 [kVA]의 전력을 공급하고 있지만 부하가 10 [kVA]보다 작은 경우 남은 전력을 계통으로 공급하는 경우에 해당한다. 식 (3-2)는 PCS와 계통이 함께 부하에 전력을 공급하는 경우를 나타낸 것으로 PCS에서 공급하는 전력이 자연 조건(태양광의 세기 혹은 바람의 양)이 좋지 않아 10 [kVA]의 전력을 공급하지 못하고 정격 이하의 전력을 발생하는 상황에서 부하가 10 [kVA]의 전력을 요구하는 경우 계통에서 부족한 전력 분을 PCS와 함께 공급하는 경우에 해당한다. 앞서 설명한 두 경우의 사고 발생을 모의하기 위하여 R-L부하를 8 [kVA]의 민감 부하로 가정하였으며, 식 (3-1)의 PCS가 부하와 계통으로 전력을 공급하는 경우는 PCS가 10 [kVA]의 전력을 공급하고 부하와 계통으로 각각 8 [kVA]와 2 [kW]의 전력을 공급하는 상황으로, 식 (3-2)의 PCS와 계통으로부터 부하에 전력을 공급하는 경우는 PCS가 8 [kVA], 계통이 2 [kW]의 전력을 부하로 공급하는 상황으로 모의하였다. 각각의 모의 상황은 정상상태인 경우에 PCS에서 발생하는 전력의 양이 부하에서 소비하는 전력보다 많거나 부족한 경우를 모의한 것인데, 실제 계통사고가 발생하였을 시 계통과 분리되어 단독운전 모드로 전환되게 되면 이러한 전력량의 차이로

PCS의 DC-link 전압이 상승하거나 감소하게 되는데, 본 시뮬레이션에서 검증하고자 하는 것은 전력의 흐름에 따른 STS 사고전류의 특성을 분석하기 위한 것이므로 PCS는 에너지 저장 장치에 의한 에너지 버퍼 역할도 함께 이루어진다고 가정 하였다. 그림 3-2와 그림 3-3은 PCS가 부하와 계통으로 전력을 공급하는 경우 제안한 방법을 이용하여 사고 발생 시 모드 전환을 하였을 때의 PCS와 STS의 전류 파형 및 부하의 전압, 전류 파형이다. 그림 3-4와 그림 3-5는 PCS와 계통이 부하에 전력을 공급하는 경우의 PCS와 STS의 전류 파형 및 부하의 전압, 전류 파형이다.



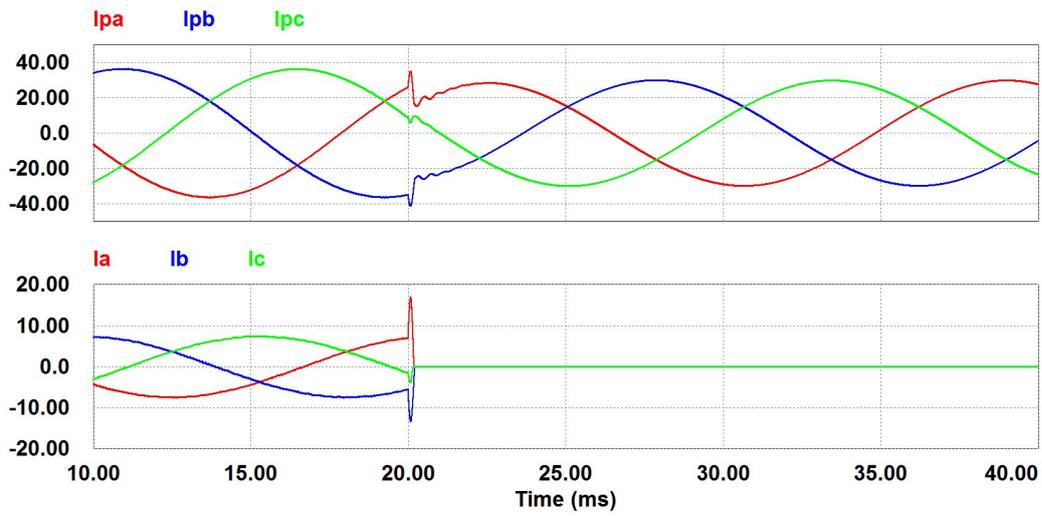


그림 3-2 PCS와 STS의 전류 파형 (PCS→부하+ 계통)

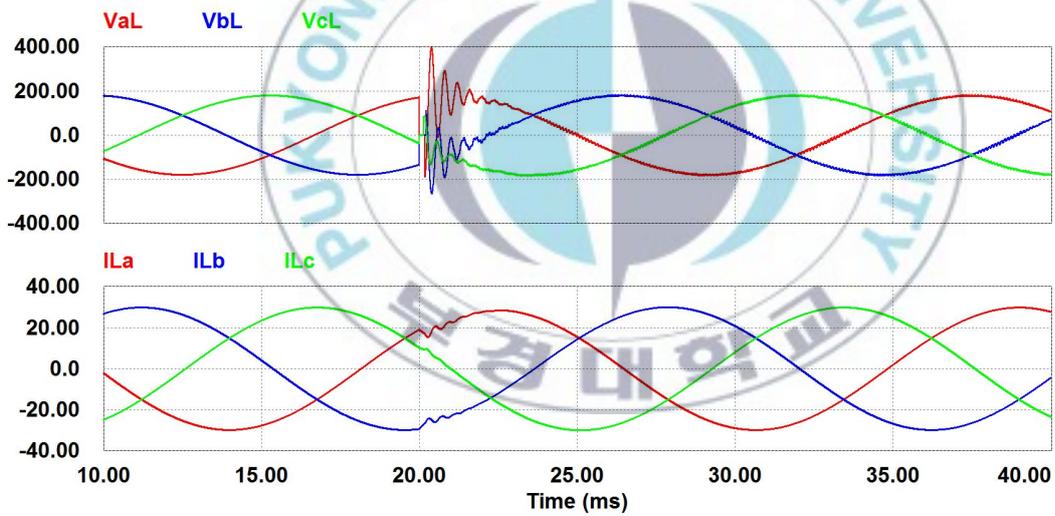


그림 3-3 부하의 전압 및 전류 파형 (PCS→부하+ 계통)

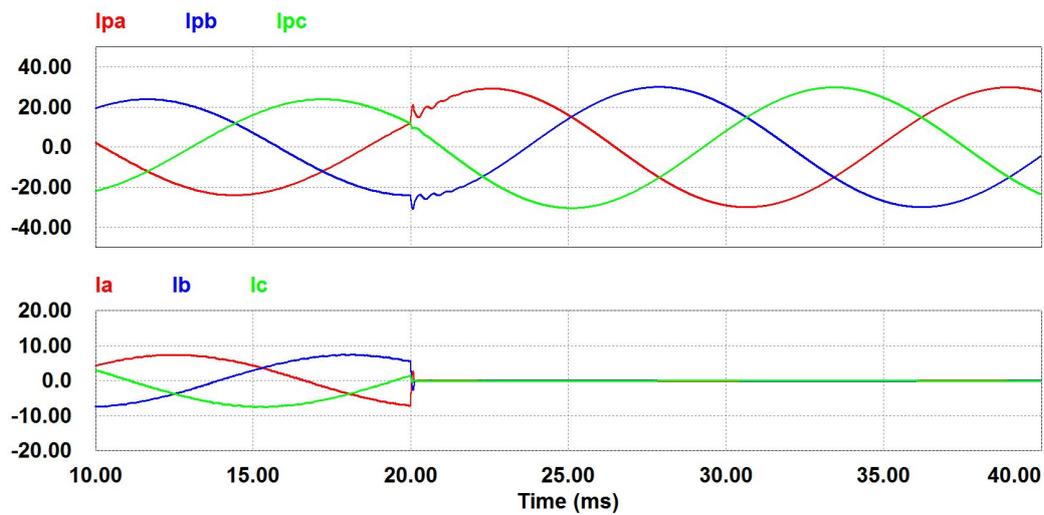


그림 3-4 PCS와 STS의 전류 파형 (PCS+ 계통→부하)

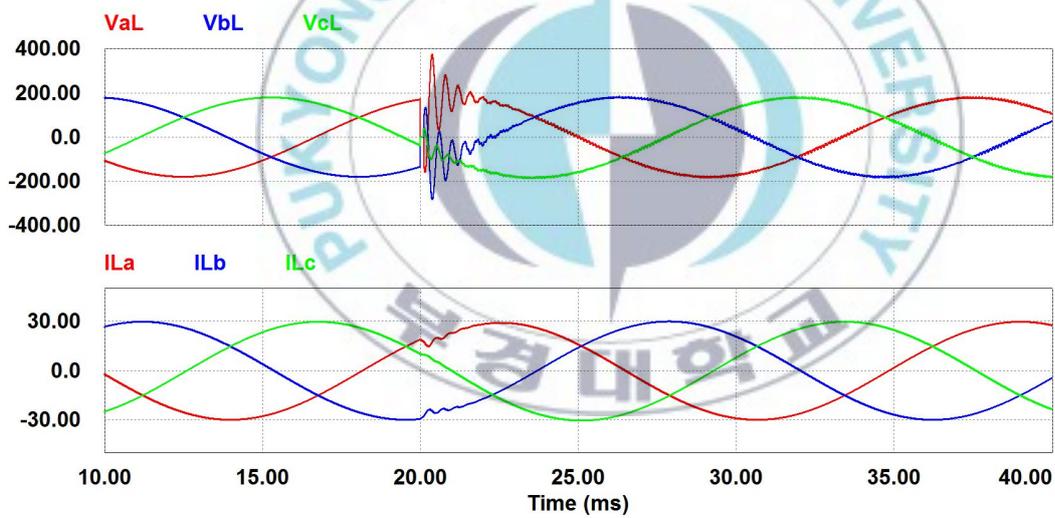
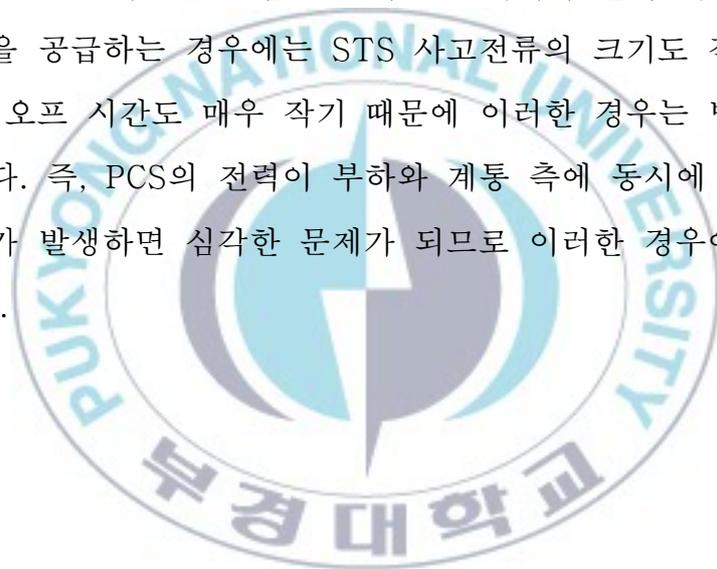


그림 3-5 부하의 전압 및 전류 파형 (PCS+ 계통→부하)

시뮬레이션 과형을 통하여 PCS에서 공급하는 전력이 부하에서 소비하는 전력보다 많아 남는 전력을 계통으로 공급하는 경우 STS에 흐르는 사고전류가 정상상태인 경우보다 크게 발생하는 것을 알 수 있다.

STS 차단시간 최소화 기법을 사용할 시 PCS와 계통이 함께 부하에 전력을 공급하는 경우에는 그림 3-4와 그림 3-5에서 알 수 있듯이 STS에 흐르는 사고 전류는 항상 정상 상태에서 STS에 흐르는 전류보다 작게 되며, PCS에서 부하와 계통에 전력을 공급하는 경우에는 그림 3-2와 3-3에서 알 수 있듯이 모드 전환 시 STS에 흐르는 사고 전류는 항상 정상 상태보다 크게 발생한다.

이상에서 알 수 있는 사실은 그림 3-4와 3-5에서와 같이 계통 측에서 부하로 전력을 공급하는 경우에는 STS 사고전류의 크기도 작을 뿐 아니라 STS 턴 오프 시간도 매우 작기 때문에 이러한 경우는 별 문제가 없다는 것이다. 즉, PCS의 전력이 부하와 계통 측에 동시에 공급하는 경우에 사고가 발생하면 심각한 문제가 되므로 이러한 경우에 대한 분석이 필요하다.



### 3.2 PCS가 계통에 공급하는 전력량에 따른 사고전류 특성

3.1절에서 PCS가 부하와 계통으로 전력을 공급하는 상황에서 계통 측에 정전 사고가 발생 하면 모드 전환 시 STS에 흐르는 사고전류는 정상상태의 전류보다 큰 전류가 흐른다는 것을 알 수 있었다. 따라서 이번에는 PCS가 10 [kVA]의 전력을 생산하고, 0 ~ 10 [kVA]의 부하를 2 [kVA]로 증가시키면서 사고발생시 STS에 흐르는 사고전류의 특성을 알아보려고 한다. 즉, 부하가 0 [kVA]이며, PCS는 10 [kW]의 전력을 모두 계통으로 공급하는 경우, 부하가 2 [kVA]이며, PCS는 8 [kW]의 전력을 계통으로 공급하는 경우이다. 이처럼 부하는 2 [kVA]씩 증가하며, PCS에서 계통으로 공급되는 전력은 2 [kW]씩 감소하지만 PCS에서 공급하는 전력은 항상 10 [kVA]를 유지하고 계통으로 공급하는 전력량의 크기가 변하는 경우에 대한 STS의 사고전류 특성을 분석하고자 한다. 부하의 역률은 0.85로 가정하였으며, 각 용량별 R-L의 값은 다음 식

$$\theta = \cos^{-1}(0.85) = 31.79^\circ \quad (3-3)$$

$$I = \frac{\frac{S_{load}}{3}}{\frac{220}{\sqrt{3}}} = I_{perphase} [A] \quad (3-4)$$

$$R = \frac{V}{I_{per\ phase} \sqrt{1 + \tan^2 \theta}} = \quad (3-5)$$

$$= \frac{\frac{220}{\sqrt{3}}}{I_{per\ phase} \sqrt{1 + \tan^2(31.79^\circ)}} = R_{per\ phase} [\Omega]$$

$$L_{per\ phase} = \frac{R_{per\ phase}}{\omega} \tan \theta = \quad (3-6)$$

$$= \frac{R_{per\ phase}}{2\pi \times 60} \tan(31.79^\circ) = L_{per\ phase} [mH]$$

을 이용하여 계산 하였으며 용량별 소자 값은 표 3-2에 나타내었다.

표 3-2 부하 용량별 R-L 소자 값

| 상당 부하<br>부하 용량 / 계통 공급 용량<br>[kVA] / [kW] | R [ $\Omega$ ] | L [mH] |
|---|----------------|--------|
| 0 / 10                                    | 0              | 0      |
| 2 / 8                                     | 20.57          | 33.8   |
| 4 / 6                                     | 10.3           | 16.9   |
| 6 / 4                                     | 6.9            | 11.2   |
| 8 / 2                                     | 5.1            | 8.5    |
| 10 / 0                                    | 4.1            | 6.7    |

그림 3-6 ~ 3-11은 부하 용량별 STS에 흐르는 사고전류 파형을 나타내었다. STS에 흐르는 사고전류를 알아보기 쉽도록 시간 축 스케일과 전류 크기 축 스케일을 동일하게 정하여 부하 용량별로 시뮬레이션 파형을 표시하였다.



1) 부하가 0[kVA]일 때

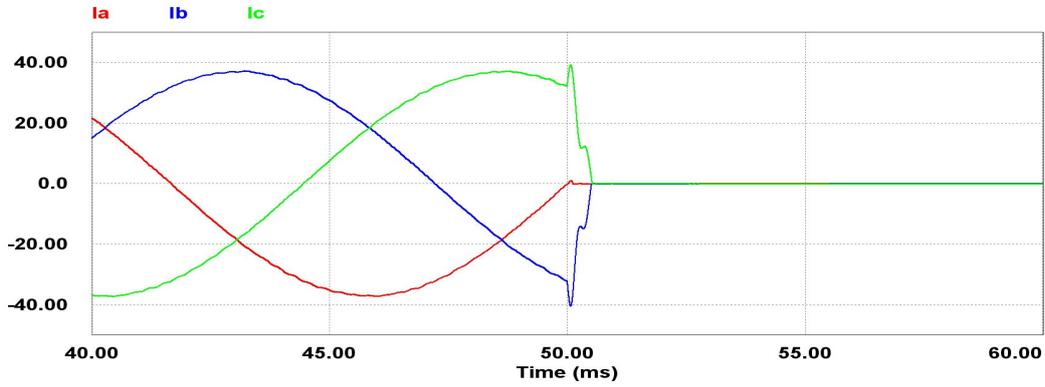


그림 3-6 PCS가 부하에 0[kVA], 계통에 10[kW]의 전력을 공급하는 경우  
이 경우 STS 턴 오프시 최대전류는 약  $-40[A]$ 이다.

2) 부하가 2[kVA]일 때

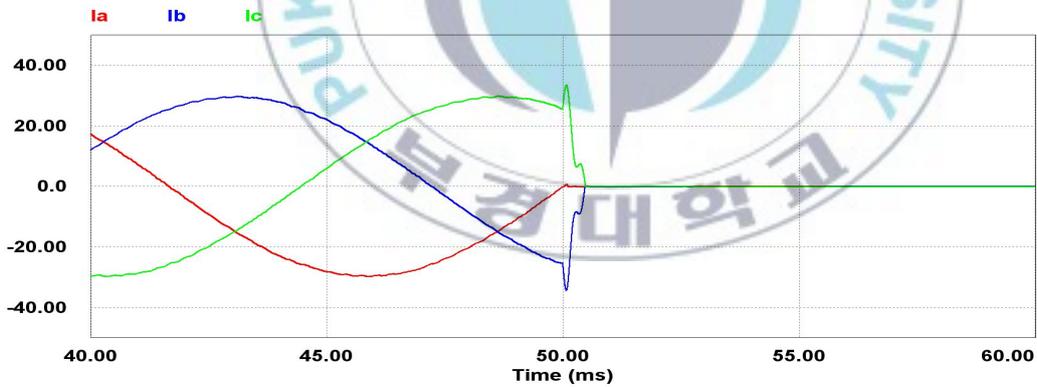


그림 3-7 PCS가 부하에 2[kVA], 계통에 8[kW]의 전력을 공급하는 경우  
이 경우 STS 턴 오프시 최대전류는 약  $-34[A]$ 이다.

3) 부하가 4[kVA]일 때

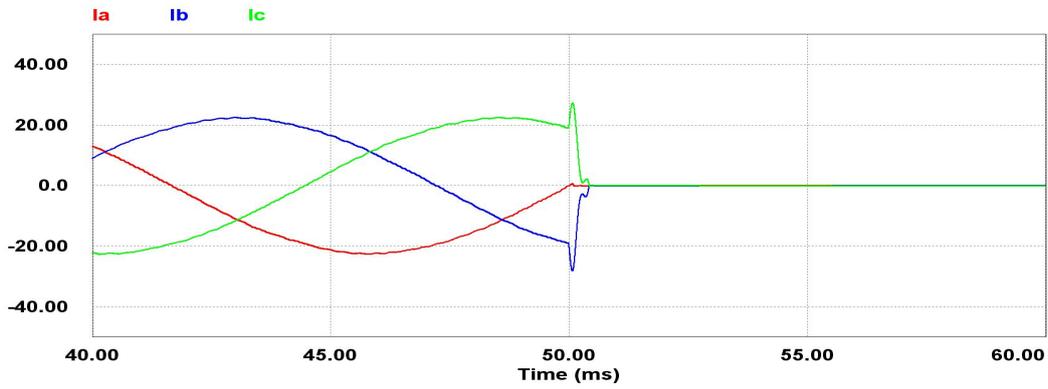


그림 3-8 PCS가 부하에 4[kVA], 계통에 6[kW]의 전력을 공급하는 경우  
이 경우 STS 턴 오프시 최대전류는 약  $-28[A]$ 이다.

4) 부하가 6[kVA]일 때

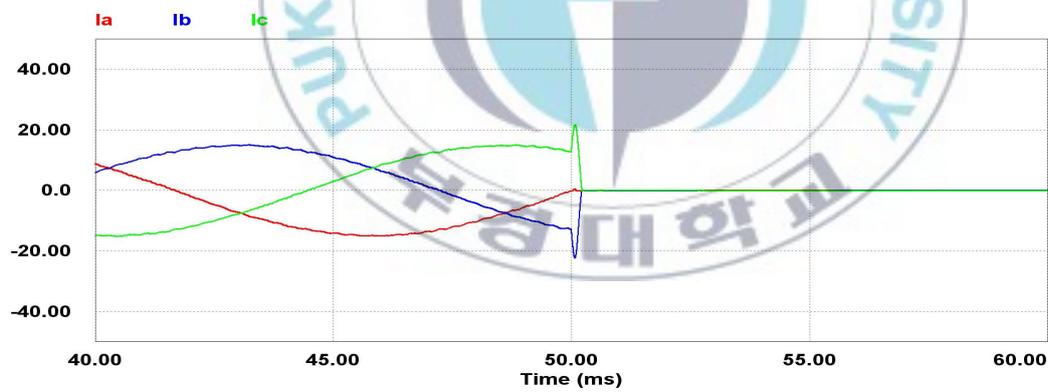


그림 3-9 PCS가 부하에 6[kVA], 계통에 4[kW]의 전력을 공급하는 경우  
이 경우 STS 턴 오프시 최대전류는 약  $-22[A]$ 이다.

5) 부하가 8[kVA]일 때

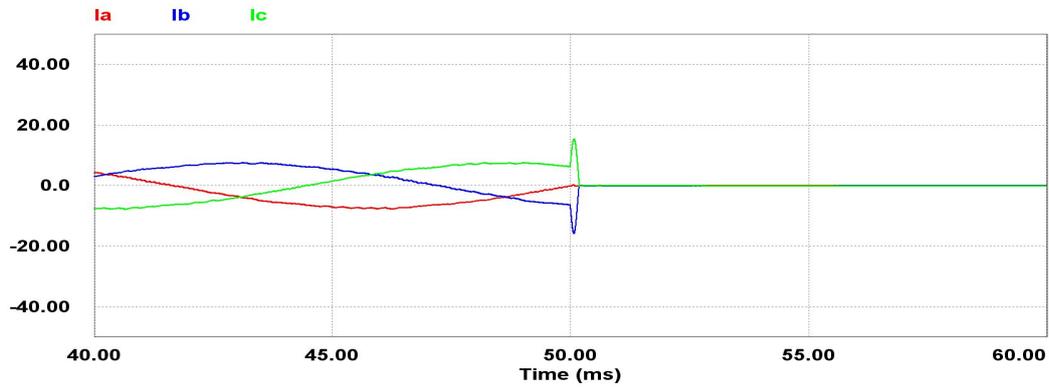


그림 3-10 PCS가 부하에 8[kVA], 계통에 2[kW]의 전력을 공급하는 경우  
이 경우 STS 턴 오프시 최대전류는 약 -15[A]이다.

6) 부하가 10[kVA]일 때

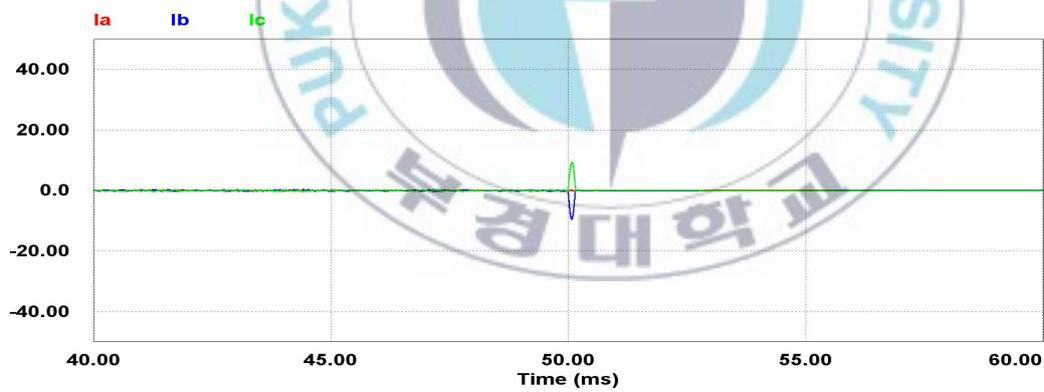


그림 3-11 PCS가 부하에 10[kVA], 계통에 0[kW]의 전력을 공급하는 경우  
이 경우 STS 턴 오프시 최대전류는 약 -9[A]이다.

그림 3-12는 그림 3-6 ~ 그림 3-11에 나타난 STS에 흐르는 사고 전류( $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$ )의 절대값의 최대치를 10 [kVA] 정격정류인 37 [A]로 정규화 하여 나타낸 그래프이다.

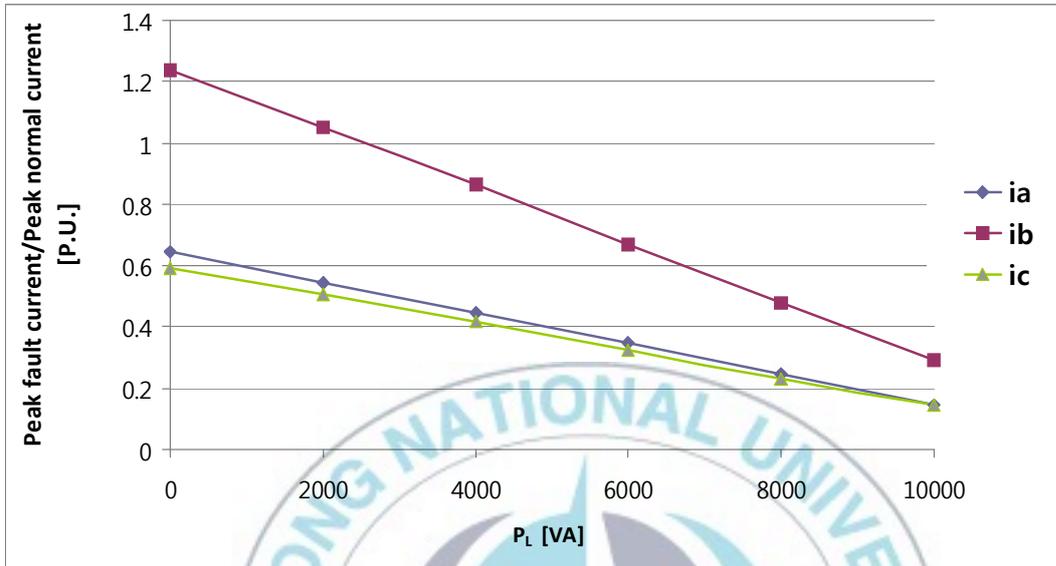


그림 3-12 STS의 사고전류를 10 [kVA]의 정격 전류로 정규화한 그래프

그림 3-12에서 알 수 있듯이 STS에 흐르는 사고전류는 정상상태에서 PCS가 계통으로 공급하는 전력의 양이 많을수록 커진다는 것을 알 수 있으며, 또한 그림 3-6 ~ 3-11을 통하여 확인 할 수 있다.

### 3.3 사고 발생 시점에 따른 사고전류 특성

앞의 3.2절에서 가장 큰 사고 전류가 흐르는 경우는 PCS에서 발생하는 전력이 모두 계통으로 공급되는 상황에서 사고가 발생한 경우라는 것을 확인하였다. 일반적으로 계통의 사고 발생 시 STS에 흐르는 사고 전류는 사고가 발생하는 시점에 따라 그 크기가 변하기 때문에 본 절에서는 이러한 특성을 분석하기 위하여 사고 발생 시점을 다르게 하여 시뮬레이션 한 결과 파형을 분석하였다. 그림 3-13은 일반적인 대칭 3상 전원의 상 전압을  $V_a$ 상을 기준으로 나타낸 그림이다.

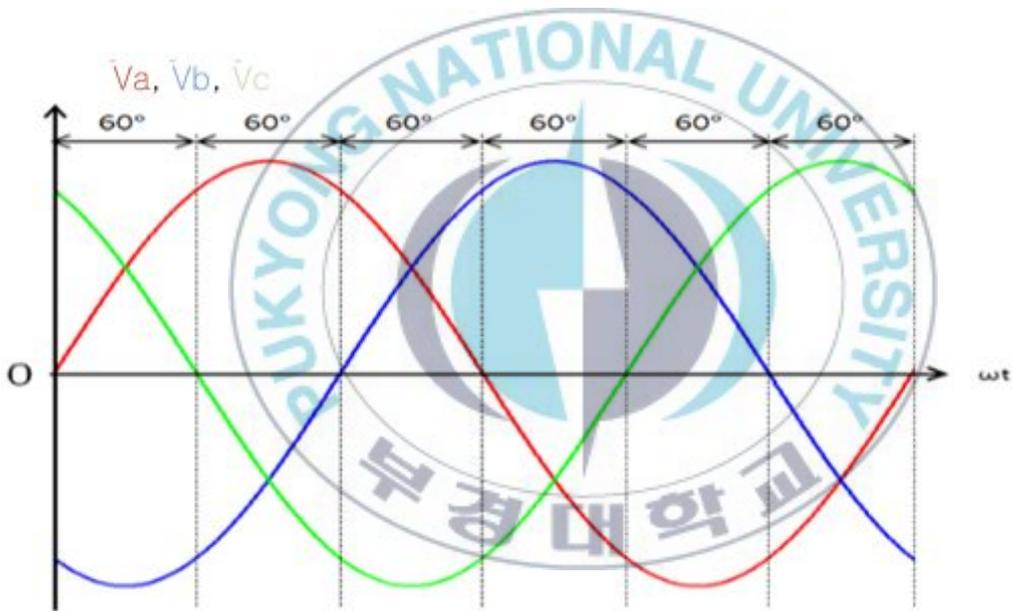


그림 3-13 3상 대칭 전원의 각 상 전압 파형

일반적으로 3상 시스템은  $60^\circ$  마다 3상의 전압 및 전류 파형과 절대값의 크기가 동일하게 주기적으로 반복되기 때문에 계통의 한주기 동안

발생하는 사고전류의 특성은  $60^\circ$  에 대한 분석만 하여도 충분히 알 수 있다. 따라서  $V_a$ 상을 기준으로 하여  $0^\circ \sim 60^\circ$  구간을  $5^\circ$  씩 증가시켜 가며 STS에 흐르는 사고 전류 크기를 분석하며, 시뮬레이션 조건은 앞서 수행하였던 시뮬레이션에서 사고전류의 크기가 가장 큰 PCS가 부하에  $0$  [kVA], 계통으로  $10$  [kW]의 전력을 공급하고 있는 경우로 설정하였다.

그림 3-14 ~ 그림 3-20은 사고 발생 시점이  $V_a$ 상 전압을 기준으로  $0^\circ \sim 60^\circ$ 까지  $10^\circ$  단위로 시뮬레이션 한 결과 파형이다. 시뮬레이션은  $5^\circ$ 단위로 수행하였지만 그 크기가 크게 차이가 나지 않았기 때문에  $10^\circ$ 단위의 결과 파형만을 나타내었다.



1) 사고 발생 시점이  $V_a$  상 기준  $0^\circ$ 인 경우.

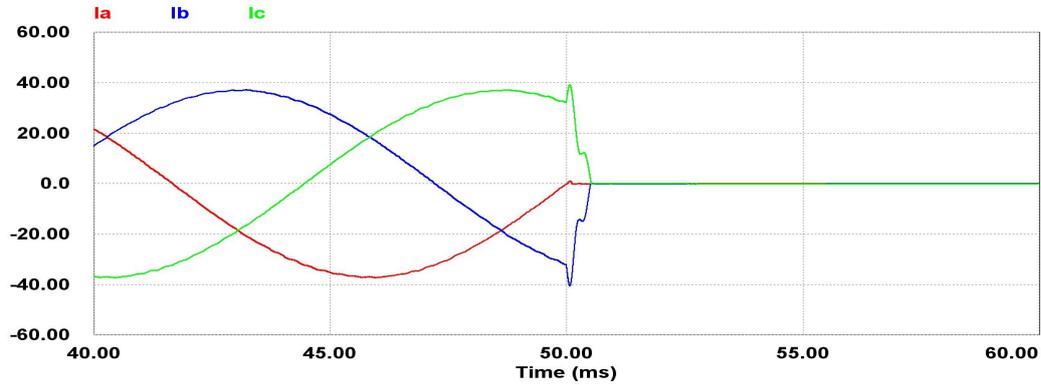


그림 3-14 사고 발생 시점이  $V_a$  전압  $0^\circ$ 인 경우 STS의 사고전류 파형이 경우 가장 큰 사고전류는  $i_b$ 이며 그 크기는  $-40.4$  [A]이다.

2) 사고 발생 시점이  $V_a$  상 기준  $10^\circ$ 인 경우.

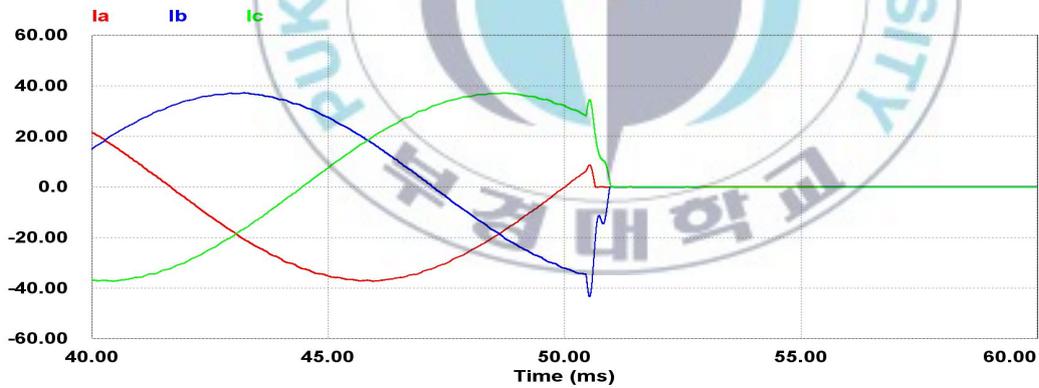


그림 3-15 사고 발생 시점이  $V_a$  전압  $10^\circ$ 인 경우 STS의 사고전류 파형이 경우 가장 큰 사고전류는  $i_b$ 이며 그 크기는  $-43.3$  [A]이다.

3) 사고 발생 시점이  $V_a$  상 기준  $20^\circ$ 인 경우.

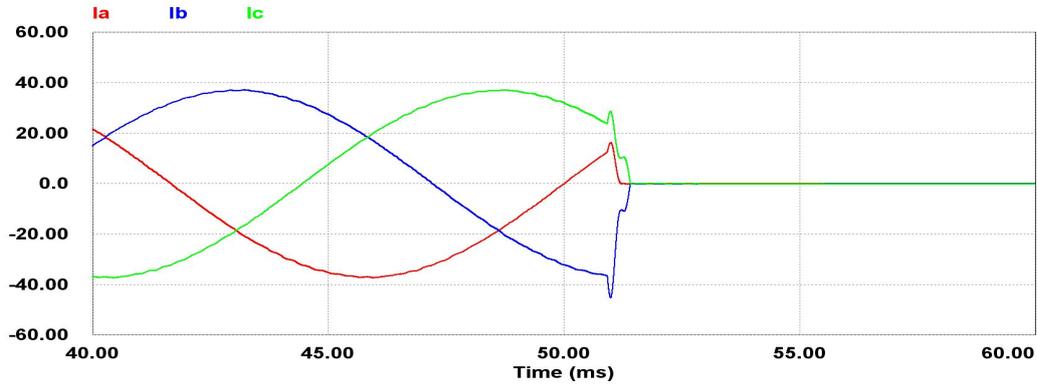


그림 3-16 사고 발생 시점이  $V_a$  전압  $20^\circ$ 인 경우 STS의 사고전류 파형이 경우 가장 큰 사고전류는  $i_b$ 이며 그 크기는  $-45.1$  [A]이다.

4) 사고 발생 시점이  $V_a$  상 기준  $30^\circ$ 인 경우.

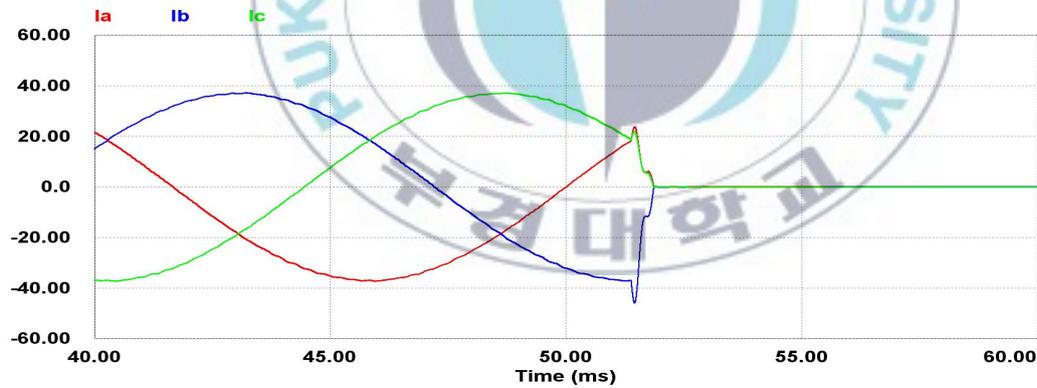


그림 3-17 사고 발생 시점이  $V_a$  전압  $30^\circ$ 인 경우 STS의 사고전류 파형이 경우 가장 큰 사고전류는  $i_b$ 이며 그 크기는  $-45.9$  [A]이다.

5) 사고 발생 시점이  $V_a$  상 기준  $40^\circ$ 인 경우.

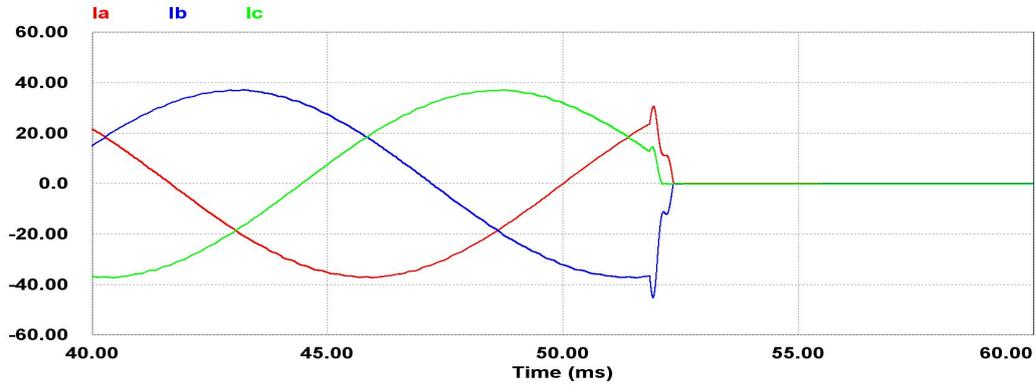


그림 3-18 사고 발생 시점이  $V_a$  전압  $40^\circ$ 인 경우 STS의 사고전류 파형이 경우 가장 큰 사고전류는  $i_b$ 이며 그 크기는  $-45.1$  [A]이다.

6) 사고 발생 시점이  $V_a$  상 기준  $50^\circ$ 인 경우.

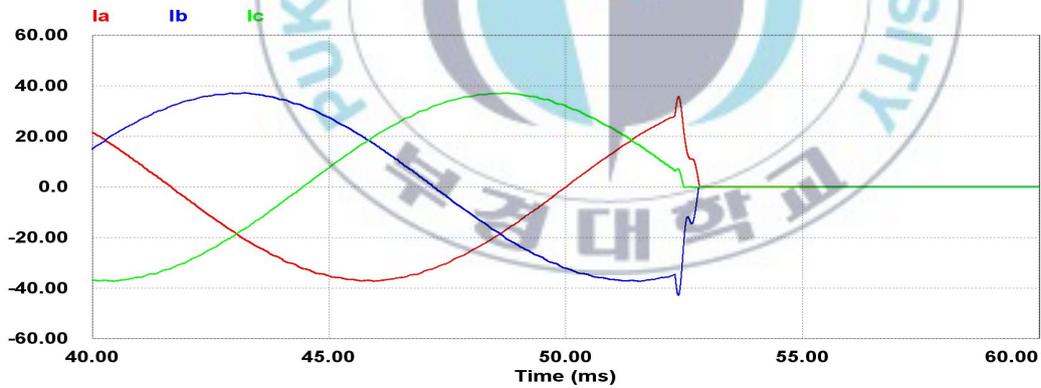


그림 3-19 사고 발생 시점이  $V_a$  전압  $50^\circ$ 인 경우 STS의 사고전류 파형이 경우 가장 큰 사고전류는  $i_b$ 이며 그 크기는  $-42.8$  [A]이다.

7) 사고 발생 시점이  $V_a$  상 기준  $60^\circ$ 인 경우.

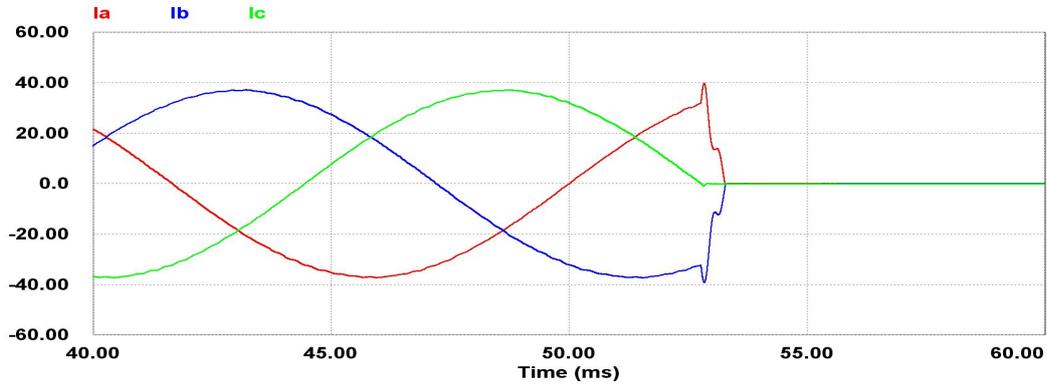


그림 3-20 사고 발생 시점이  $V_a$  전압  $60^\circ$ 인 경우 STS의 사고전류 파형  
이 경우 가장 큰 사고전류는  $i_b$ 이며 그 크기는  $-39.1$  [A]이다.



그림 3-21은 5°단위의 시뮬레이션 결과 파형을 이용하여 STS에 흐르는 사고전류의 크기를 10 [kVA] 정격전류로 정규화 하여 나타낸 그래프이다.

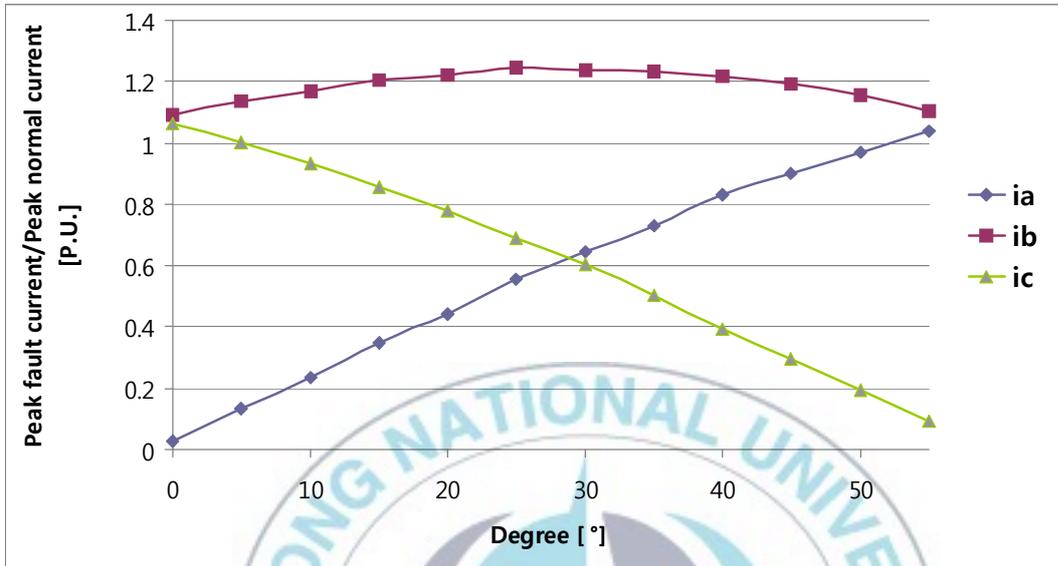


그림 3-21 사고발생 시점에 따른 사고전류의 크기

그림 3-21의 그래프에 나타난 것처럼 PCS에서 발생하는 전력을 모두 계통으로 공급하는 경우  $V_a$  상을 기준으로 30° 시점에서 사고 발생 시 STS의 사고전류의 피크가 가장 크게 발생한다는 것을 알 수 있다. 또한  $V_a$  상을 기준으로 90°인 시점에서 사고가 발생 시 STS에 흐르는 사고전류는  $i_a$ 가 가장 크게 발생 할 것으로 예측 할 수 있으며, 종합적으로  $V_a$  상 기준으로  $[60^\circ \times n + 30^\circ]$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ )가 되는 시점에서 사고 발생 시 가장 큰 사고전류가 발생 한다고 예상 할 수 있다.

### 3.4 STS 차단시간 분석

본 논문에서 제안하는 STS 차단시간 최소화 기법을 이용하여 계통 사고 발생 시 부하에 공급되는 전력 외란 시간이 크게 줄어드는 것을 확인 할 수 있었다. 계통 사고 발생 시 부하에 외란이 발생하는 시간은 사고 발생 시점에서 사고 신호가 PCS와 STS로 전달되는데 걸리는 시간과 PCS와 STS가 사고 신호를 전달받은 시점으로부터 최소화 기법을 적용하여 STS를 턴 오프하게 되는 시점까지의 시간(이하  $T_{sts\_turn\ off}$ ), 그리고 STS가 턴 오프 된 시점에서 PCS가 전압모드로 전환되어 부하에 안정된 전력을 공급하게 되는 시점까지의 시간의 총 합으로 계산될 수 있다. 하지만 사고 발생 시 사고 신호가 PCS와 STS로 전달되는 시간은 사고 검출 방법의 설계 기준에 따라 다르고, STS가 턴 오프 된 후 PCS가 전압모드로 운전될 때, PCS의 제어방법에 따라 부하에 공급하는 전력의 과도상태 특성이 다르며, 부하에 공급되는 전력의 안정도를 판별하는 기준은 다양한 방법이 적용 될 수 있는데, 본 절에서는 이러한 이유 때문에 STS의 차단시간을 앞서 정의한  $T_{sts\_turn\ off}$ 로 가정하고, 시뮬레이션을 수행하여  $T_{sts\_turn\ off}$ 의 특성을 분석하였다. STS 차단 시간 특성 또한 시뮬레이션은 5° 단위로 수행하였지만 그 크기가 크게 차이가 나지 않았기 때문에 그림 3-22 ~ 3-27에 나타낸 것처럼 10° 단위의 결과 파형만을 나타내었다. 각 그림에서 차단시간은 Thy\_sig 신호가 영으로 된 시점부터 Delay\_com\_sig 신호가 영으로 되는 시점까지의 시간이다.

1)  $V_a$ 의 위상이  $0^\circ$ 에서 사고 발생 시

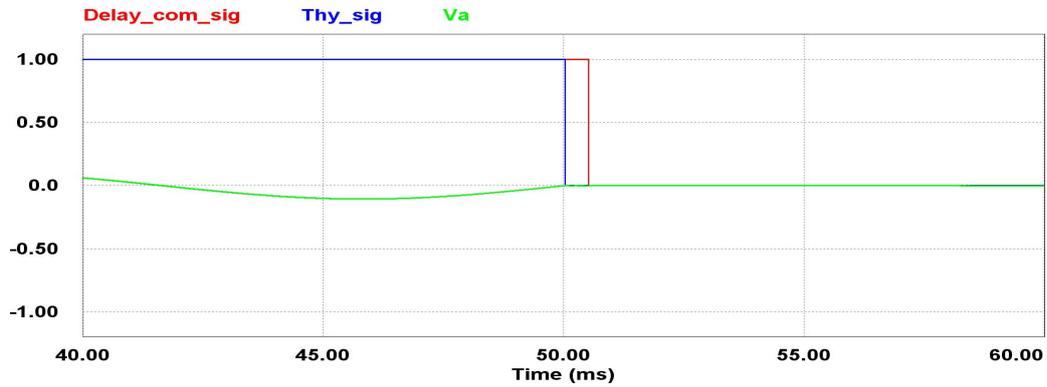


그림 3-22  $V_a$ 의 위상이  $0^\circ$ 에서 사고 발생 시  $T_{sts\_turn\ off}$

이 경우  $T_{sts\_turn\ off}$ 는 약 489 [us]이다.

2)  $V_a$ 의 위상이  $10^\circ$ 에서 사고 발생 시



그림 3-23  $V_a$ 의 위상이  $10^\circ$ 에서 사고 발생 시  $T_{sts\_turn\ off}$

이 경우도  $T_{sts\_turn\ off}$ 는 약 482 [us]이다.

3)  $V_a$ 의 위상이  $20^\circ$ 에서 사고 발생 시

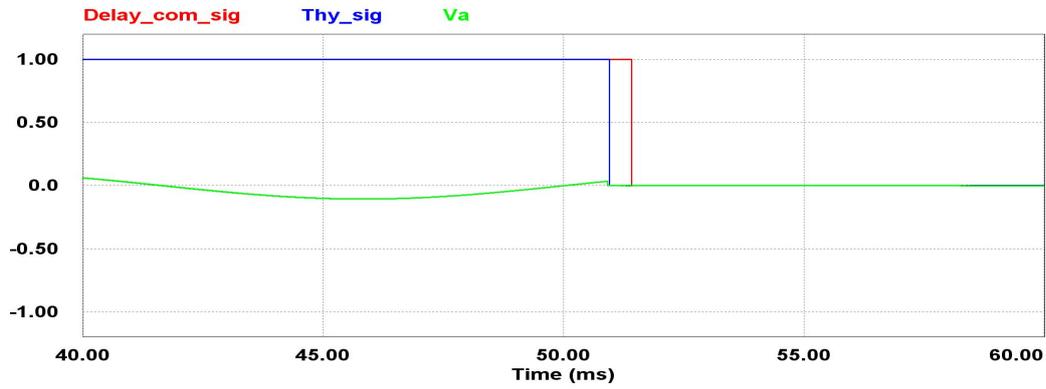


그림 3-24  $V_a$ 의 위상이  $20^\circ$ 에서 사고 발생 시  $T_{\text{sts\_turn off}}$  이 경우  $T_{\text{sts\_turn off}}$ 는 약 451 [us]이다.

4)  $V_a$ 의 위상이  $30^\circ$ 에서 사고 발생 시

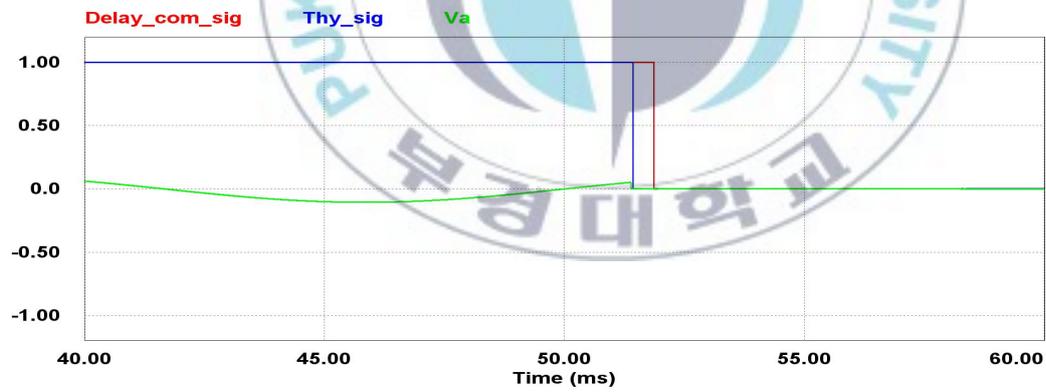


그림 3-25  $V_a$ 의 위상이  $30^\circ$ 에서 사고 발생 시  $T_{\text{sts\_turn off}}$  이 경우  $T_{\text{sts\_turn off}}$ 는 약 444 [us]이다.

5)  $V_a$ 의 위상이  $40^\circ$ 에서 사고 발생 시

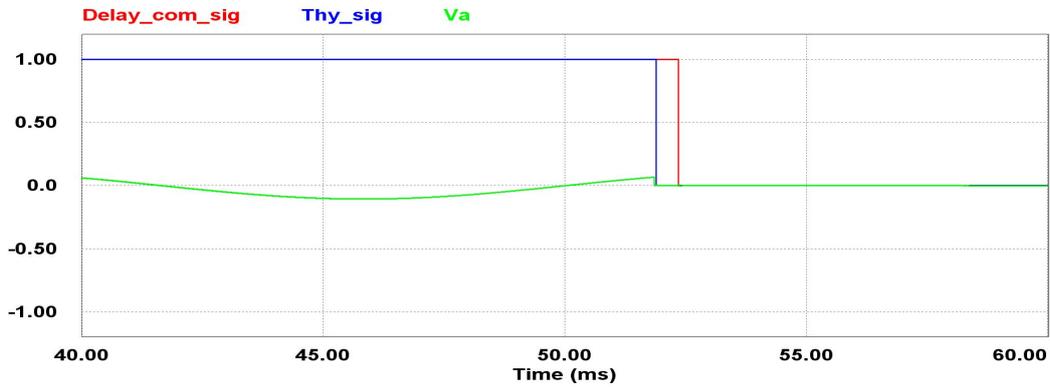


그림 3-26  $V_a$ 의 위상이  $40^\circ$ 에서 사고 발생 시  $T_{sts\_turn\ off}$  이 경우  $T_{sts\_turn\ off}$ 는 약 468 [us]이다.

6)  $V_a$ 의 위상이  $50^\circ$ 에서 사고 발생 시

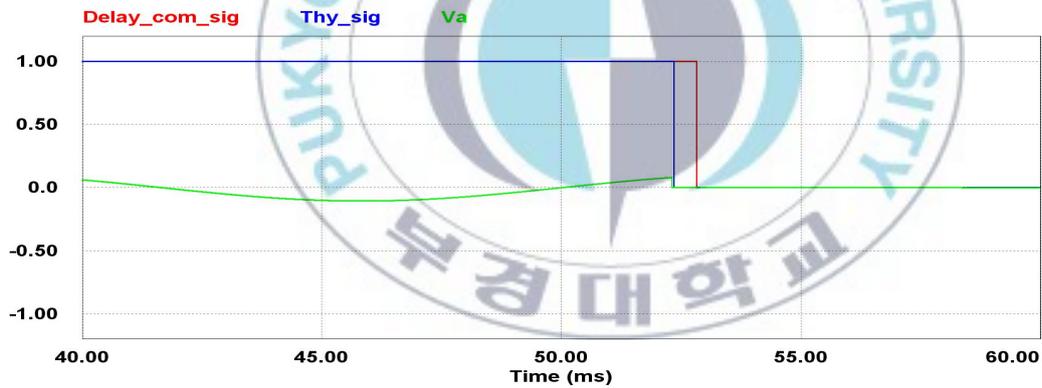


그림 3-27  $V_a$ 의 위상이  $50^\circ$ 에서 사고 발생 시  $T_{sts\_turn\ off}$  이 경우  $T_{sts\_turn\ off}$ 는 약 481 [us]이다.

그림 3-28은 5° 단위로 시뮬레이션 결과 파형을 그래프로 나타낸 것이다. 그림에 나타난 것 처럼 사고 발생 시 사고 신호가 PCS와 STS로 전달 된 직후에서 STS가 턴 오프 되는데 걸리는 시간은 0°에서 약 490 [us]정도로 가장 긴 시간이 걸리며 30°에서는 약 445 [us]로 가장 짧은 것을 알 수 있다. 대략적으로 30°를 기준으로 좌우 대칭이 되는 특성을 보이는 것을 알 수 있다.



그림 3-28 STS의 차단시간 특성 그래프

## 5. 결 론

본 논문에서는 마이크로그리드와 상용계통을 연결하는 STS(Static Transfer Switch)의 차단시간을 최소화하는 기법을 제안하고 부하 상황에 따른 STS 차단시간 해석을 하였다. STS를 구성하는 SCR 사이리스터는 게이트로 턴오프 할 수가 없기 때문에 60 [Hz] 계통에서는 최대 8.3 [ms]의 턴오프 시간을 갖는다. 따라서 계통 측 단락사고 발생 시 수 [ms] 동안 마이크로그리드를 계통으로부터 차단할 수 없게 되어 이때 막대한 사고전류가 흐르며 마이크로그리드의 전력품질이 매우 저하된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 마이크로 소스용 PCS, 3상부하, STS, 계통으로 구성되는 10 [kVA] 시스템에 적용하여 시뮬레이션 하였다.

부하용량의 변화, 전력흐름의 방향 등 다양한 상황을 고려하여 분석한 결과 최악의 조건에서 STS 턴오프 시간이 490 [us]임을 확인하였다. 이는 8.3 [ms]의 6% 정도에 지나지 않는 값으로서 STS 차단시간을 현저히 감소시켰음을 알 수 있다. 따라서 제안한 방법은 STS를 신속히 차단함으로써 STS 사고전류의 크기도 획기적으로 감소시키고 PCS를 전류모드로부터 전압모드로의 전환을 용이하게 하며 마이크로그리드의 전력품질 향상에 크게 기여할 것으로 기대한다. STS의 사고전류 크기는 시뮬레이션을 통해 사고발생 시점에 30°일 때 제일 많이 흐르게 된다. STS의 사고전류 크기는 부하변동에 따른 PCS에서 계통으로 공급하는 전력의 양이 클수록 증가한다는 것 알 수 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] M. Barnes, J. Kondoh, H. Asano, J. Oyarzabal, G. Ventakaramanan, R. Lasseter, N. Hatziargyriou, T. Green, "Real-World Microgrids-An Overview", 2007. SoSE '07. IEEE International Conference on System of Systems Engineering, 2007, pp.1-8.
- [2] C. Yuen, A. Oundalov, "The Feasibility and Profitability of Ancillary Services Provision from Multi-MicroGrids", 2007 IEEE Lausanne , Power Tech, 2007, pp.598-603.
- [3] P. Thounthong, S. Rael, B. Davat, "Control of Fuel Cell/Supercapacitors Hybrid Power Sources", Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005. 31st Annual Conference of IEEE, 2005.
- [4] 정재현, 박해영, 노의철, 김인동, 김홍근, 전태원, "PCS의 전류제어모드와 전압 제어모드의 전환기법" 전력전자학회 2010년도 전력전자 학술대회 논문집 2010. 11, pp.265-266.
- [5] 손예, 정재현, 노의철, 김인동, 김홍근, 전태원, "계통사고 발생시 STS 차단시간 최소화 기법과 사고전류 특성" 전력전자학회 2010년도 전력전자 학술대회 논문집 2010. 11, pp.232-233.
- [6] R. Tirumala, N. Mohan, Henze. C, "Seamless transfer of grid-connected PWM inverters between utility-interactive and stand-alone modes" 2002. APEC 2002. Seventeenth Annual IEEE, vol. 2, 2002, pp.1081-1086.
- [7] Cha. Hanju. T.-K. Vu, "Comparative analysis of low-pass output filter for single-phase grid-connected Photovoltaic inverter", 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE, Applied Power Electronics Conference and Exposition(APEC), 2010, pp.1659-1665.
- [8] Shengli Huang, Li Kong, Haiping Xu, "Control algorithm research on seamless transfer for distributed resource with a LCL filter", 2008. DRPT 2008. Third International Conference on, 2008, pp.2810-2814.

## 감사의 글

2005년 봄, 머나먼 타국으로 유학을 온 저에게 한국은 적응하기 어려운 나라였습니다. 하지만 따뜻한 정을 가진 수많은 분들의 도움으로 2010년 겨울, 석사학위 수료를 앞둔 몇몇한 전기인인 제가 여기에 서 있습니다. 6년이라는 세월의 결정체인 석사논문을 발표하고 나니 가슴 뿌듯한 성취감을 느낍니다. 대학원 과정은 저 자신을 학문적으로나 인격적으로 더욱 성숙하게 해 준 소중한 시간이었습니다.

유학 생활에 적응하기 힘들어 하는 저에게 또 한분의 부모님이 되어 때로는 엄격하게 때로는 부드럽게 대해 주신 노의철 은사님께 감사와 존경의 마음을 전해 드립니다. 교수님께서는 글로는 표현하지 못할 정도의 애정을 가지고 지도해 주셔서 석사과정 동안 혼자서는 이룰 수 없을 수많은 경험과 지식을 쌓을 수 있었으며 유학생으로서 갖고 있던 두려움을 이겨낼 수 있었습니다. 교수님께 가르침을 받은 것이 저에게는 무엇보다 커다란 기쁨이었고, 앞으로도 교수님의 기대에 어긋나지 않는 사람이 되도록 부단히 노력하겠습니다. 그리고 바쁘신 와중에도 저의 학위논문을 심사해 주시면서 많은 조언과 격려를 해주신 김인동, 김영학 교수님과 그리고 많은 열정을 가지고 학문적 지도와 지원을 아끼지 않으셨던 전기공학과 교수님들께도 깊이 감사드립니다.

익숙하지 않은 외국어 수업에 어려워하는 저에게 많은 도움을 주시고 항상 예의범절을 지켜 실험실 전체의 모범이 되어 주신 박해영, 김진영 선배님께 감사드리며, 특히 2년 동안 실험실 생활에 어려움이 없도록 지원과 조언을 아끼지 않으며 논문을 완성하기까지 많은 도움을 주신 정재현 선배님께 진심으로 감사의 말을 전합니다. 대학원 진학에 고민

하고 있는 저에게 많은 조언을 해 주신 김형운 선배님께 감사드리며 가족과 떨어져 지내게 되어 외로운 저에게 친구 그 이상의 따뜻함으로 가족의 정을 느낄 수 있게 해 주었던 동기 유재도, 김상일, 송웅협, 조원우 학형에게 진심을 담아 고마움을 전합니다. 앞으로 대학원 생활을 시작할 이중규, 김학수, 이창열, 이수형, 권창근 후배들에게는 항상 최선을 다하며 절대 포기하지 않는 마음 자세를 전해주고 싶습니다.

매일 밤 전화를 걸어 저의 안부를 걱정해 주신 사랑하는 부모님께 이 논문을 바치며, 고국에 돌아가서도 저를 믿고 도와주신 모든 분들의 뜻을 잊지 않고 한 사람의 전력전자 인으로서 본연의 일에 충실한 모습을 항상 보여드리겠습니다.

