

KTX 고속전철 추진제어시스템의 동기전동기 구동 동작특성 분석

Dynamic Characteristics Analysis on the Synchronous Motor for Propulsion System of KTX High Speed Train

윤차중†
Cha-Jung Yoon

박상운*
Sang-Woon Park

이은규**
Eun-Kyu Lee

ABSTRACT

This paper describes how to apply to commutate of thyristor efficiently. Thyristor is used for the high power system, as the research to secure domestic technology of the Current Source Inverter(CSI) for the synchronous motor operation which is used for the propulsion system of KTX. It has been composed to be available for the stable switching operation of the thyristor by supplementing problem of load commutation method, according to small Counter Electric Motive Force(EMF) at low speed area of synchronous motor, via auxiliary commutation circuit using forced commutation method. We also have verified through the simulation using the Matlab.

1. 서 론

국내에서 운영 중인 KTX 경부고속철도차량은 프랑스 알스톰사로부터 제작기술을 이전 받아 조립 및 제작이 되었으며, 추진방식은 동력집중식의 동기 전동기를 사용하고 있다. 동기 전동기를 구동하기 위한 추진제어시스템은 대전력용에 적합한 Thyristor를 사용하여 전류형 인버터 방식을 사용하고 있다. 하지만 대전력용에 사용되는 스위칭 소자인 Thyristor의 안정적인 구동을 위해서는 적절한 전류(Commutation, 轉流)방식이 요구된다. 일반적으로 Thyristor의 Commutation방식에는 Thyristor의 입력 소스의 특성을 이용하는 Line Commutation방식, 부하단의 특성을 활용하는 Load Commutation 방식, 그리고 별도의 Commutation회로를 구성하여 원하는 시점에 Commutation하기 위한 Forced Commutation방식이 활용되고 있다.

KTX 추진제어장치의 특성에 따라 Line Commutation방식은 사용할 수 없고, 전류형 인버터의 출력단에 동기전동기의 회전에 따른 역기전력에 의한 특성을 이용한 Load Commutation방식을 사용하는 것이 유용하다. 하지만 동기전동기가 저속에서 운전되는 경우 역기전력 발생이 매우 작기 때문에 Load Commutation방식에 의한 스위치의 turn-on이 원하는 시점에 이루어지지 않게 된다.

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 동기전동기가 저속에서 운용되는 경우 별도의 보조 정류회로를 구성하여 강제 정류할 수 있도록 하는 회로를 구성하였고, 이를 Matlab을 활용하여 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

2. 시스템 구성

그림 1은 CSI를 이용한 동기전동기 구동시스템의 회로를 보여준다. Thyristor를 사용한 Line-Commutated Converter(Phase-controlled Rectifier)와 Load-Commutated Converter (Inverter)로 구성되어있고, Line-Commutated Converter는 단상 또는 3상 Rectifier로 구성된다.

† 책임저자, 한국철도공사, 기술연구처
E-mail : korea@korail.com

* 한국철도공사, 기술연구처

** (주)우진산전 기술연구소, 연구소장

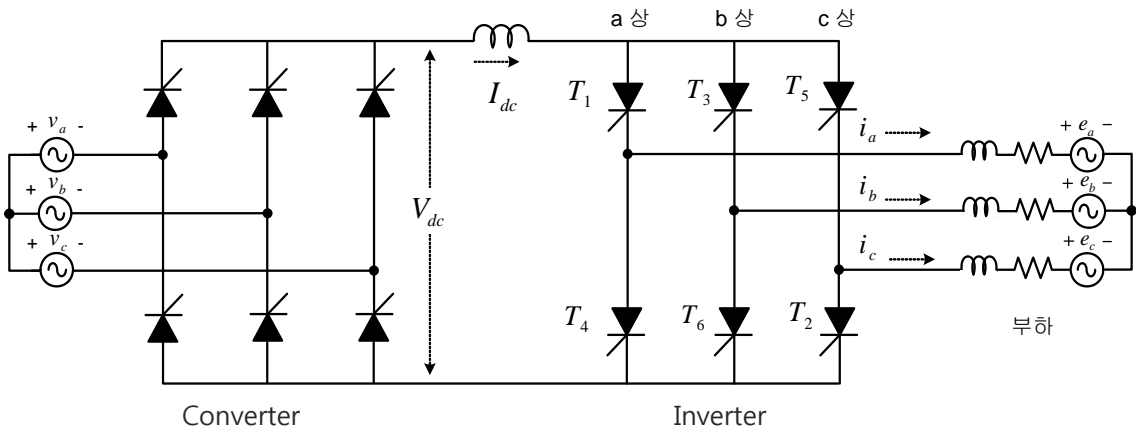


그림 1. CSI를 이용한 동기전동기 구동시스템

2.1 CSI 동작

CSI 시스템의 Inverter는 출력 전류의 주파수만을 조절한다. 전류의 크기는 직류 입력 전류 I_{dc} 의 크기에 의해 결정되는데 이는 Phase-controlled rectifier의 점화각을 조절하여 V_{dc} 를 제어하면서 이루어진다. 이때 부하에 전류를 공급하는 Thyristor는 120° 씩 2개가 동작하고, 점화각 α 는 a상 아래의 스위치 T4의 도통시점을 기준한다. 그림 2에 CSI의 동작을 나타내었다.

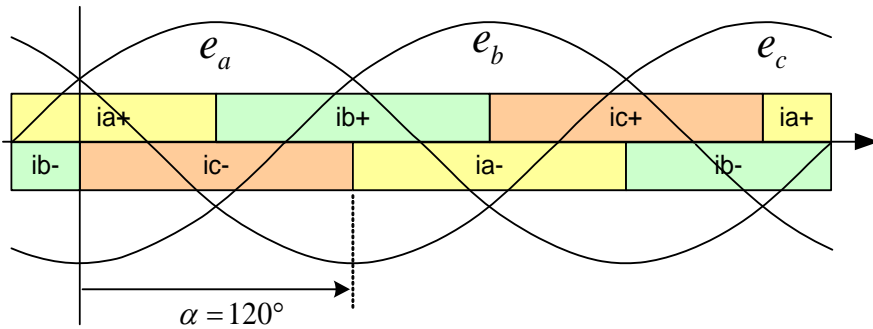


그림2. CSI 동작

Commutation의 방법에 따라 Thyristor는 각기 다른 Turn-Off 방식을 가지게 된다. Line Commutation은 전원 특성에 의해, Load Commutation은 부하 특성에 의해, Forced Commutation은 외부회로에 의해 Thyristor의 전류가 0이 되어 Turn-off가 된다. 이러한 특성으로 인해 Load Commutation은 진상 역률 운전이 가능한 동기 전동기에서 사용하고 Forced Commutation은 지상 역률운전만 가능한 유도 전동기에서 사용하고 있다.

3. Load Commutation CSI

Load Commutation은 Thyristor T4의 도통 시점을 기준으로 점화각 α 가 $0 < \alpha < 180^\circ$ 인 구간에서 가능하다. 그림 3은 Thyristor T1, T5의 Load Commutation을 나타내었다. $e_c > e_a$ 구간에서 T1을 Turn-on을 하게 되면 T5는 역방향 바이어스가 되어 자동으로 Turn-off 된다. 즉, Load Commutation이 가능하다는 것을 확인할 수 있다. 그림 4에서는 점화각 α 가 30° 일 때의 상전압과 선간 전압을 나타내었다.

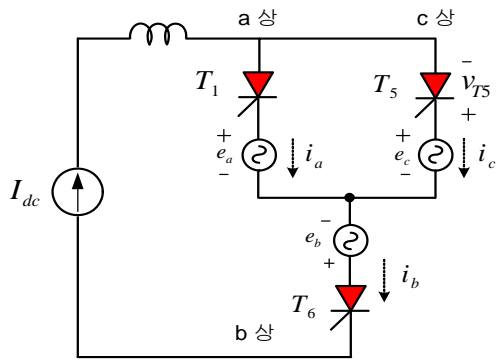


그림 3. T1, T5 Load Commutation

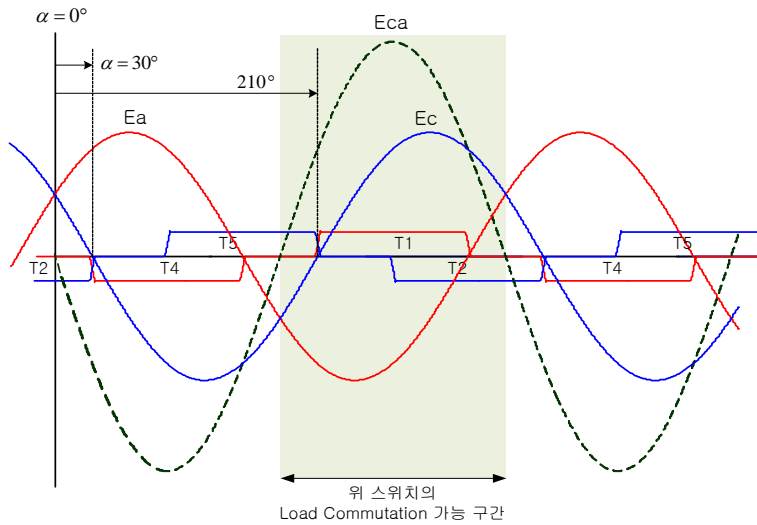


그림 4. $\alpha = 30^\circ$ 일때(T4 기준) 파형

그림 5와 같이 $e_c < e_a$ 의 구간에서 T4를 Turn-on하게 되면 T2는 역방향 바이어스가 되어 자동 Turn-Off 되어 Load Commutation이 가능하다. 이때의 상전압과 선간 전압의 파형을 그림 6에 나타내었다.

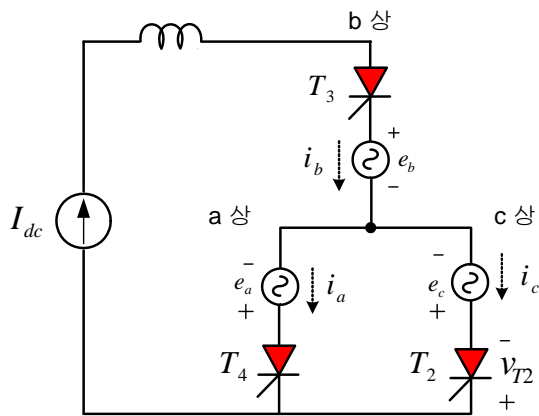


그림 5. T4, T2 Load Commutation

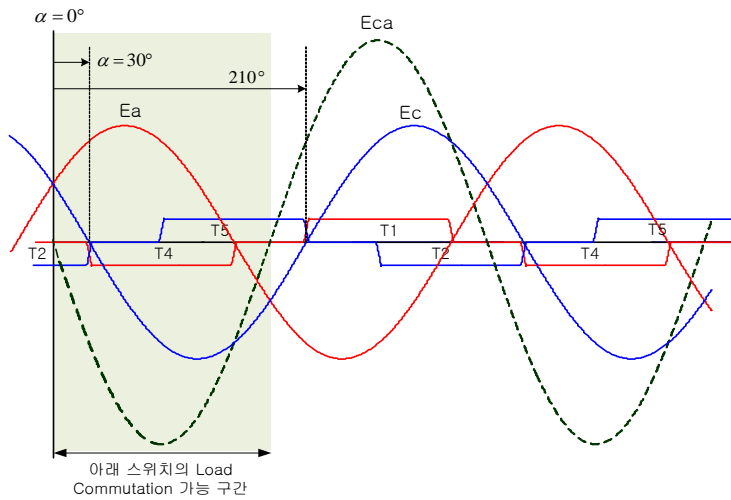


그림 6. $\alpha = 30^\circ$ 일때(T4 기준) 파형

3.1 Load Commutation CSI의 동작 모드

Load Commutation CSI로 운전되는 동기 전동기에서 점화각 α 에 따라 두가지의 동작 모드를 가지게 된다. 첫 번째는 점화각이 $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ 의 범위에 있을 때 동기 전동기의 Regenerative Braking 영역으로 파워는 0보다 작게 된다. 이 때 Thyristor와 a상 전압의 파형을 그림 7에 나타내었다. 두 번째는 점화각이 $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ 의 범위에 있을 때 동기 전동기의 Motoring 영역으로 파워는 0보다 크게 된다. 이때의 Thyristor와 a상 전압의 파형을 그림 8에 나타내었다.

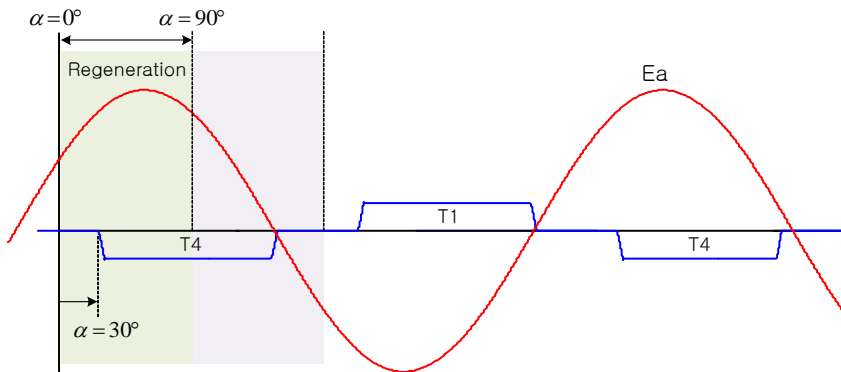


그림 7. Thyristor와 a상 전압의 파형(Power = 0 : $\alpha = 90^\circ$)

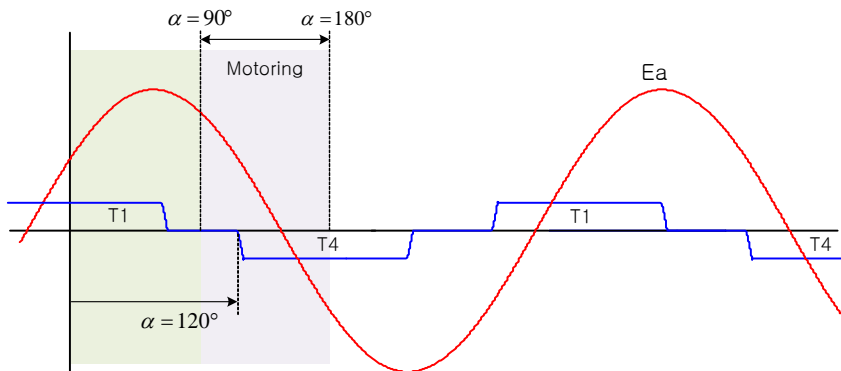


그림 8. Thyristor와 a상 전압의 파형 (Power $P > 0$: $\alpha = 180^\circ$)

4. Forced Commutation CSI

Gate를 통한 Turn-off가 불가능한 스위칭 소자인 Thyristor를 사용하는 전류형 인버터에서는 Thyristor를 Turn-off시키기 위한 특별한 Commutation 방법이 필요하다. 동기 전동기를 적용한 AC 모터 구동시스템에서는 동기 전동기의 계자 권선을 과여자 하면 Leading power factor로 운전할 수 있다. 이 경우 전동기의 역기전력에 의한 Thyristor의 Natural commutation 또는 Load commutation이 가능하다. Load Commutation을 사용할 수 있다면 인버터 회로는 상당히 간단하게 된다. 그러나 기동시나 저속 영역에서는 전동기의 역기전력(Counter ElectroMotive Force)이 Thyristor를 Commutation하기에 충분하지 않기 때문에 이러한 Load Commutation을 이용할 수 없다. 따라서 동기 전동기를 기동과 저속 영역에서 Thyristor를 Commutation하기 위한 별도의 방법이 필요하다.

본 논문에서는 KTX의 주 인버터에서 채용하고 있는 간단한 Forced Commutation 회로를 사용하였다. 이 Forced Commutation 회로는 아래 그림9에 보이는 바와 같이 하나의 Commutation Capacitor C와 2개의 보조 Thyristor(T_p , T_n)로 구성된다. 이 Forced commutation 회로는 인버터의 Load Commutation이 불가능한 저속 영역에서만 동작하기 때문에 이 회로의 정격은 전동기의 정격보다 매우 작다. 동기 전동기의 중성점에 연결되어 있는 Commutation Capacitor C에 흐르는 전류의 기본파 성분은 인버터 운전 주파수의 3배가 되기 때문에 이러한 Commutation 기법을 적용한 인버터를 "Third Harmonic Auxiliary Commutated Inverter"이라 부른다.

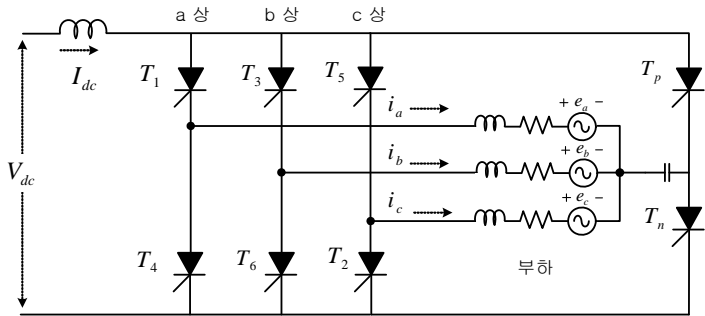


그림9. Third Harmonic Auxiliary Commutated Inverter

4.1 Auxiliary Commutation circuit의 동작

Capacitor C와 2개의 보조 Thyristor(T_p , T_n)로 구성된 Auxiliary Commutation circuit의 동작은 3구간으로 나누어서 설명할 수 있다. 그림 10에 보이는 것처럼 Thyristor T_3 과 T_2 가 도통하여 b상과 c상을 통해 I_{dc} 전류가 흐르고 있고, Capacitor C의 전압은 충전되어 있다고 가정한다.

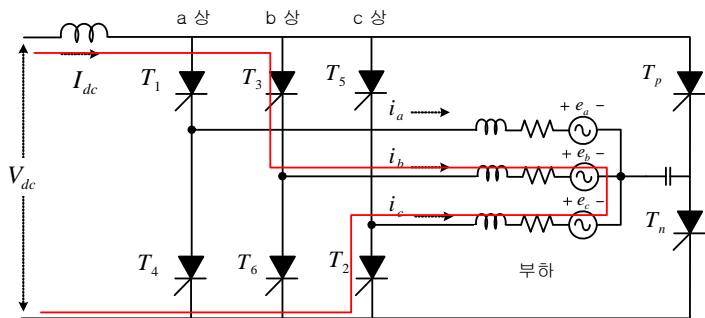


그림10. T2에서 T4로 전환 동작

4.1.1 구간 1

T_2 를 Turn-off시키기 위해 보조 회로의 T_n 을 Turn-on 하면 T_2 에 Capacitor C의 전압이 인가되어 T_2 는 바로 Commutation 되기 시작한다. 단, 이 경우 Commutation이 되기 위해서는 Capacitor C의 전압은 c상 역기전력 보다 커야 한다. Commutation이 되면서 T_2 에 흐르는 전류는 점차 감소되며 Capacitor 전류는 증가한다. 이에 따라 Capacitor C의 전압은 초기와는 반대로 극성으로 충전된다. T_2 에 흐르는 전류가 0이 되면 T_2 는 Turn-off 된다. 이러한 동작을 그림 11에 나타

내었다.

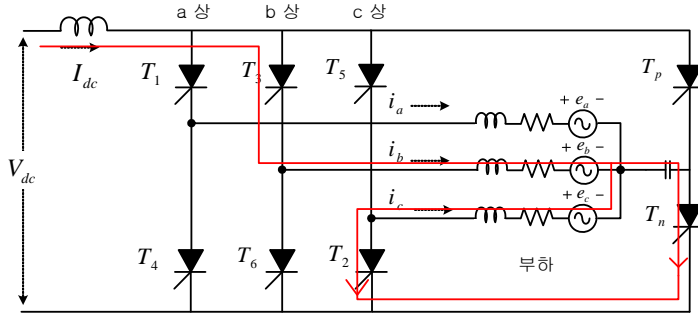


그림 11. 구간 1의 동작 흐름도

4.1.2 구간 2

T2는 Turn-off 되었으므로 T3과 Tn이 도통한다. Capacitor에 흐르는 전류는 Idc와 같으므로 Capacitor C의 전압은 $-e_a$ 가 될 때까지 일정한 기울기로 상승한다. 이 경우 상전류는 모두 0이므로 상전류의 도통 구간이 120° 보다 작아지게 된다. Commutation Thyristor(Tp, Tn)에 흐르는 전류는 토크 발생에 기여하지 않는 zero sequence 성분이다. 그 결과 Commutation 구간에서의 출력 토크는 1/2로 감소된다. 그림 12는 구간 2에서의 동작을 보여준다.

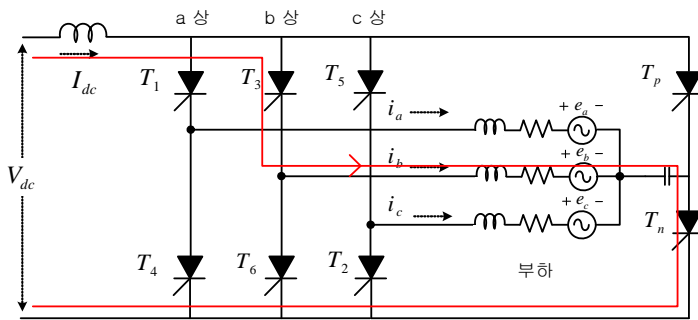


그림 12. 구간 2의 동작 흐름도

4.1.3 구간 3

Capacitor의 전압이 $-e_a$ 이 되면, T4가 도통하기 시작하여 Capacitor 전류는 감소하고 T4로 전류가 흐르기 시작한다. 이에 따라 Capacitor C의 전압의 증가율은 감소한다. T4에 흐르는 전류가 Idc와 같게 되면 Capacitor에 흐르는 전류가 0이 되어 Tn은 Turn-off 된다. Capacitor C의 전압은 Commutation 초기 전압과 크기는 같고 극성이 달라진다. 충전된 Vc의 최대값은 식 (1)과 같다.

$$V_C = I_{dc} \sqrt{\frac{L}{C}} - E_m \sin(\alpha + \pi/6) \quad (1)$$

이 Vc 값은 다음 Commutation 동작 즉, Tp의 Turn-on시 T3을 Commutation하기 위한 적절한 크기의 전압이 되어야 한다. 이를 위해 $e_c < -e_a$ 이어야 한다. 이 조건에 의해 점화각 α 의 동작범위는 $90^\circ < \alpha < 270^\circ$ 로 제한된다. 이러한 동작을 그림 13에 나타내었다.

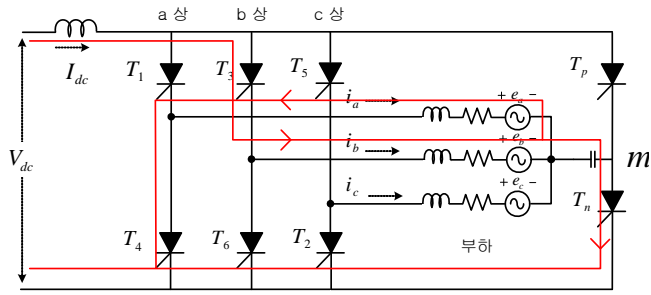


그림 13. 구간 3의 동작 흐름도

4.2 Delay Angle

Forced Commutation에서는 CSI의 Main Thyristor들은 Commutation Capacitor C의 전압에 의해 Turn-off 된다. 이 경우 다음 Commutation 구간에서 Thyristor의 확실한 Turn-off를 보장하기 위해서는 직전 Commutation 구간에서 Capacitor C의 전압이 다음 Thyristor를 Turn-off 하기에 필요로 하는 적절한 전압으로 충전되어 있어야만 한다.

이를 위해 Capacitor C의 전압을 측정해서 그 전압이 원하는 값보다 작은 경우에는 미리 결정된 전압까지 충전되도록 Main Thyristor의 Gating을 지연해 주어야 한다. Delay Angle을 사용하면 앞에서 설명한 점호각 α 의 동작범위의 제한이 줄어든다.

5. 시뮬레이션

본 논문의 시뮬레이션은 Matlab Simulink를 사용하여 수행하였다. 먼저 Load Commutation과 Forced Commutation 각각의 시뮬레이션을 수행하고, 마지막으로 두 가지 방법을 모두 사용한 전체의 시뮬레이션을 수행하였다.

5.1 Load Commutation CSI의 동작 Simulation

Load Commutation CSI 동작 특성을 살펴보기 위해 사용된 블록도는 그림 14와 같다.

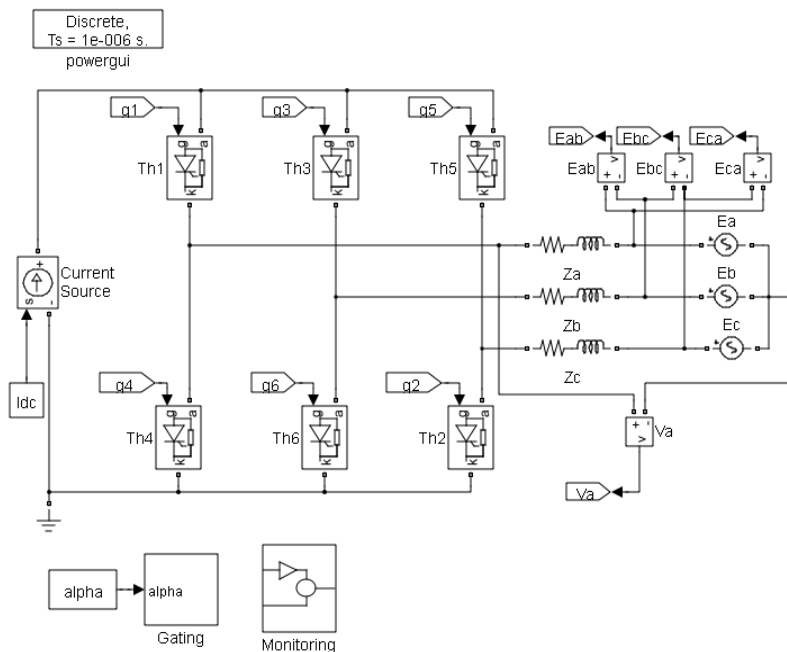


그림 14. Load Commutation CSI 동작 Simulation 블록도

동기전동기의 Motoring 영역($90^\circ < \alpha < 180^\circ$)과 Regenerative Braking 영역($0^\circ < \alpha < 90^\circ$)에서의 동작 특성을 보기 위해 $\alpha = 150^\circ$, $\alpha = 90^\circ$ (Power=0), $\alpha = 30^\circ$ 에 대해 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션 조건으로 운전 주파수는 5Hz, 인버터의 입력 직류 전류는 20A이고, 3상 부하는 R-L과 역기전력으로 이루어져있다. 이 때 역기전력의 최대값은 20V이다. 그림 15는 시뮬레이션 결과를 보여준다.

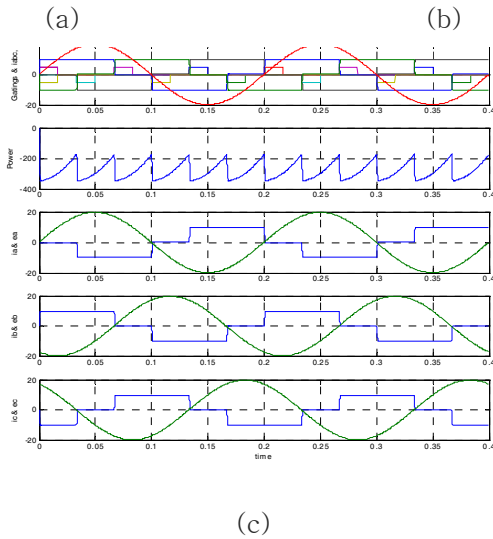
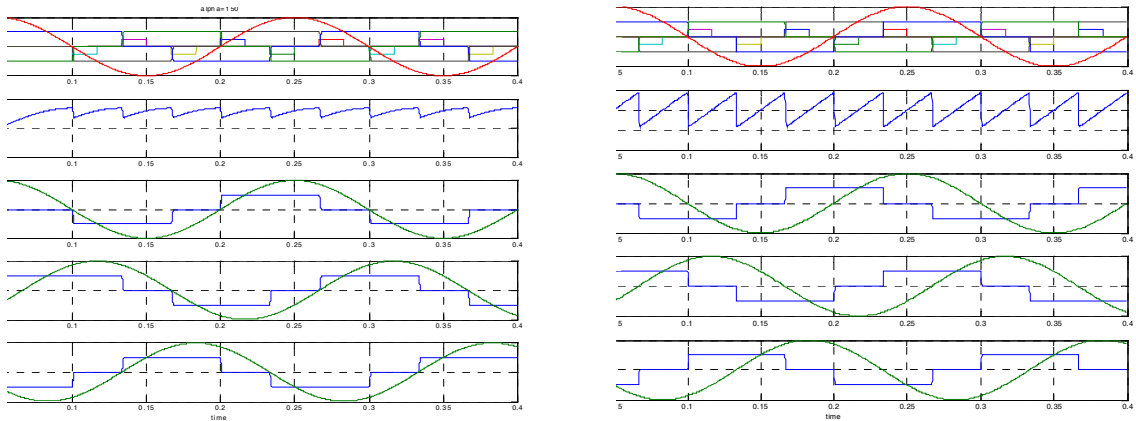


그림 15. Load Commutation 시뮬레이션 결과 (a) $\alpha = 150^\circ$: Motoring Mode (b) $\alpha = 90^\circ$: Power = 0 (c) $\alpha = 30^\circ$: Regenerative Braking Mode

5.2 Forced Commutation CSI의 동작 Simulation

4절에서 설명한 Commutation Capacitor C와 2개의 보조 Thyristor(T_p , T_n)로 구성된 Forced Commutation 회로를 가진 CSI(Third Harmonic Auxiliary Commutated Inverter)의 동작 특성을 알아보기 위해 Matlab Simulink를 사용하여 시뮬레이션을 실행하였다. 시뮬레이션에 사용된 블록도는 그림 16과 같다.

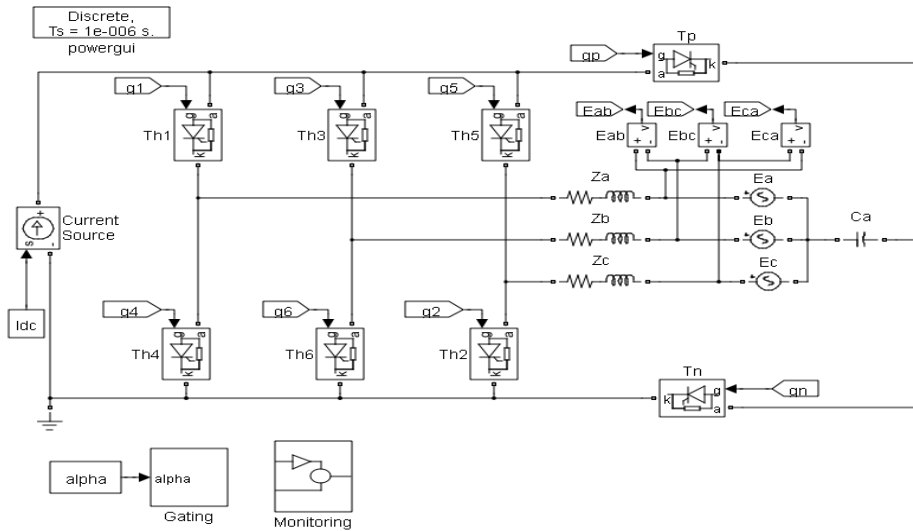


그림 16. Forced Commutation 회로 시뮬레이션 블록도

시뮬레이션 조건으로 운전 주파수는 2Hz, 인버터의 입력전류는 10A이고, Load Commutation이 가능하지 않도록 역기전력의 최대값을 15V로 설정하였다. 전류(Commutation)용 커패시터는 150uF이고 초기 충전전압은 -15[V]이다. 점호각은 $\alpha = 120^\circ$ 에서 수행하였으며, 그림 17과 18은 이에 대한 시뮬레이션 결과를 보여준다. 그림 19는 Delay Angle을 사용한 시뮬레이션 결과이다.

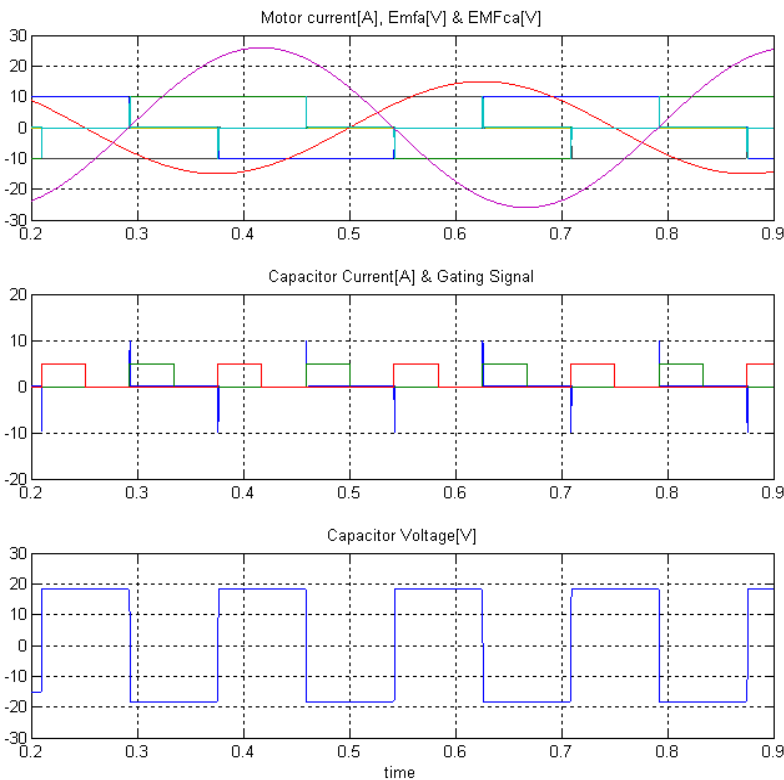


그림 17. Forced Commutation 시뮬레이션 결과

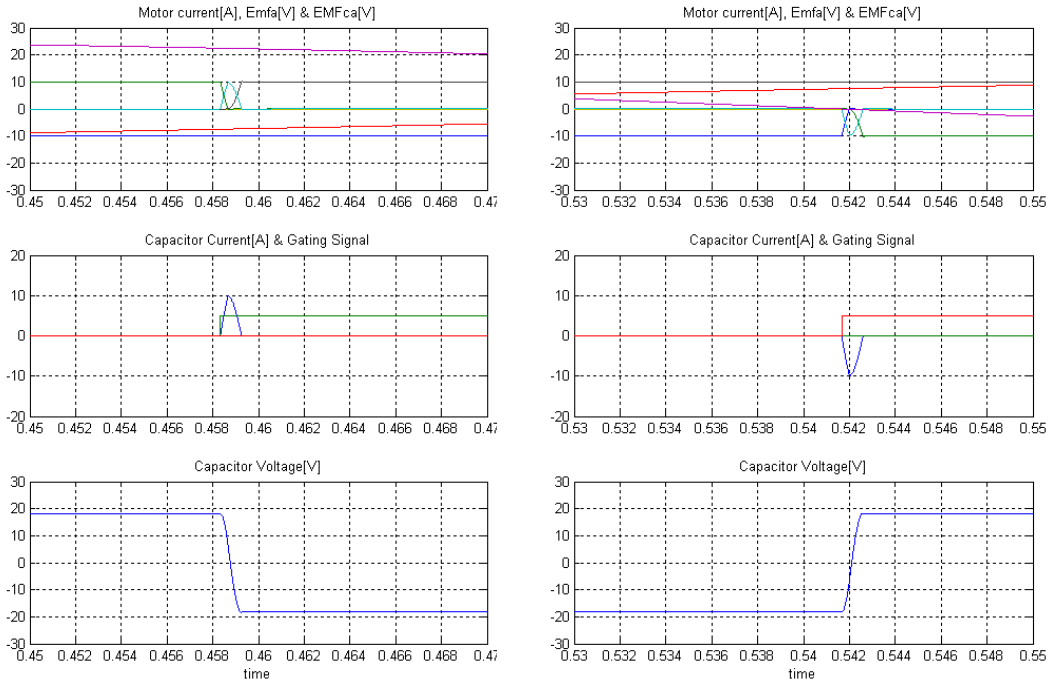


그림 18. Commutation 구간 확대 파형

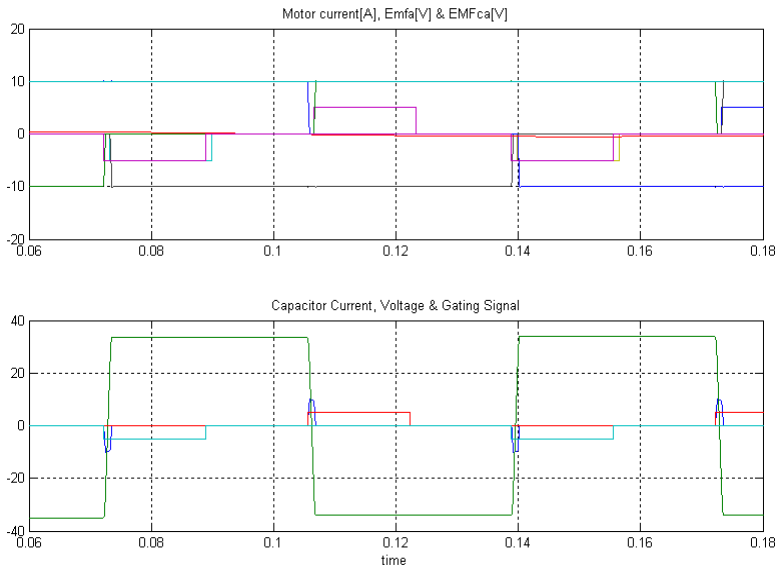


그림 19. Delay Angle을 사용한 시뮬레이션 파형

5.3. CSI를 이용한 동기 전동기 구동

저속에서는 Forced Commutation을 이용하고 고속에서는 Load Commutation으로 동작하는 CSI를 사용하여 동기 전동기를 구동하는 시뮬레이션을 실행하였다. Self-Controlled Synchronous Motor Drive 기법을 적용하여 동기 전동기를 구동하였는데, 이 방식에서는 회전자의 위치 정보로부터 인버터 구동을 위한 Thyristor 점호 신호의 Sequence를 결정한다. 이 경우 전동기의 속도에 따라 인버터의 출력 주파수가 자동적으로 변하게 된다.

Self-Controlled Synchronous Motor Drive에 대한 시뮬레이션 블록도는 그림 20과 같다. Forced Commutation 회로는 Third Harmonic Auxiliary Commutated Inverter를 사용하였다.

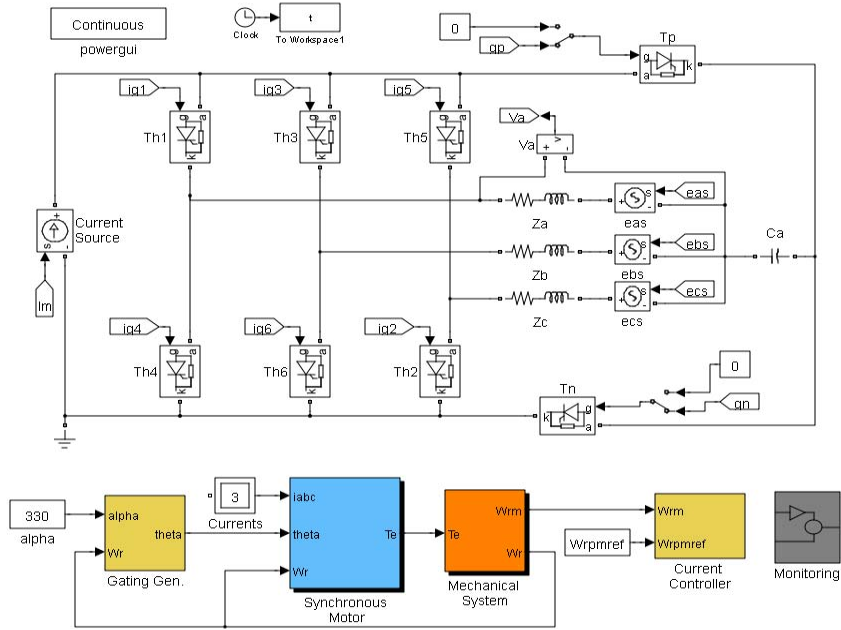


그림 20. Self-Controlled Synchronous Motor Drive에 대한 시뮬레이션 블록도

시뮬레이션을 구현하기 위해 4극 동기 전동기를 사용하였으며, 인버터의 입력 전류는 20A이고, Commutation Capacitor는 400uF, 초기 충전전압은 -35[V]로 설정하였다. 30[rpm] 이하의 저속 영역에서는 Forced Commutation을 사용하였으며, 30[rpm] 이상인 경우 Load Commutation으로 동작시켰다. 그림 21은 제어를 사용하여 전동기의 속도를 500[rpm]까지 운전한 시뮬레이션 결과이다. 전 구간에서 원활한 Commutation이 이루어짐을 알 수 있는데, 약 0.45초에서 Forced Commutation에서 Load Commutation으로 전환됨을 볼 수 있다. Forced Commutation으로 동작 시 Commutation 구간에서 출력 토크가 적어짐을 확인하였다.

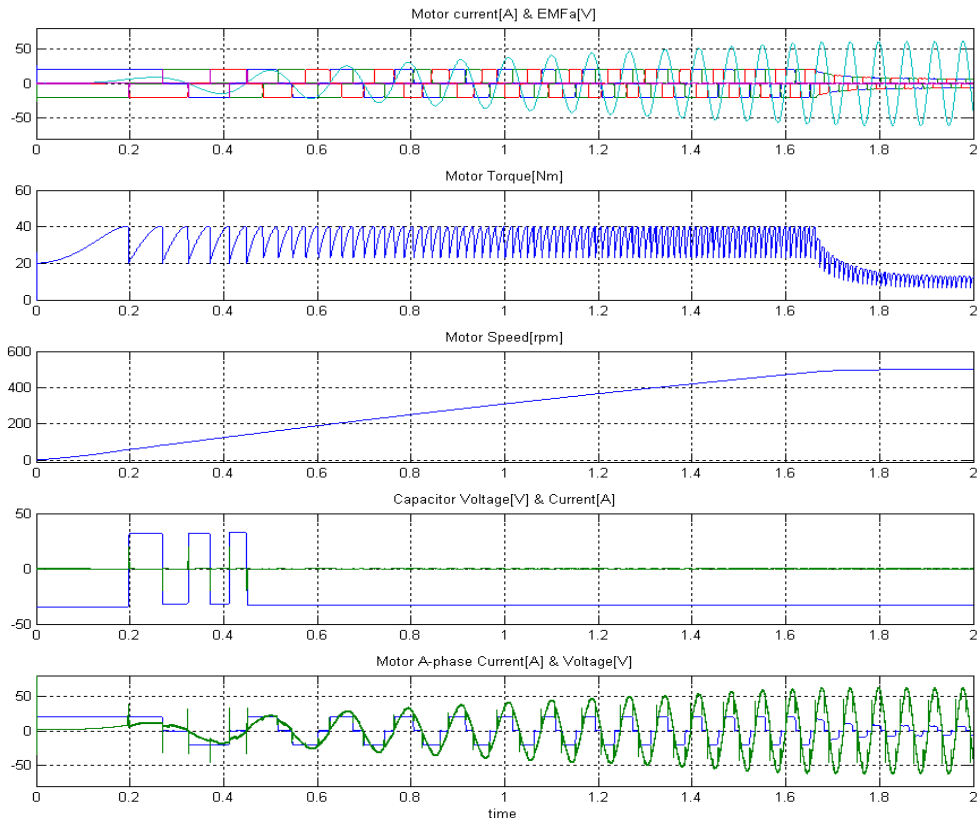


그림 21. CSI를 이용한 동기 전동기 구동 시뮬레이션 결과

6. 결론

본 논문에서는 CSI를 이용한 동기 전동기의 구동 시스템에 대하여 연구를 수행하였다.

현재 KTX 추진제어장치 특성에 따라 전류형 인버터의 출력단에 동기전동기의 회전에 따른 역기전력 특성을 이용한 Load Commutation을 사용하고, 동기 전동기의 저속과 기동시의 문제를 보완하기 위한 별도의 Auxiliary Commutation 회로를 구성한 Forced Commutation 방식을 사용하였다. 각 Commutation의 원리와 특성을 분석하고, Matlab을 이용한 시뮬레이션을 통하여 본 논문의 타당성을 검증하였다.

참고문헌

1. "Adjustable Speed Drive with a Brushless DC Motor" IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY AND GENERAL APPLICATIONS, VOL. IGA-7, NO. 4, JULY/AUGUST 1971, NORIAKI SATO AND VSEVOLOD V. SEMENOV
2. "Analysis of a Novel Forced-Commutation Starting Scheme for a Load-Commutated Synchronous Motor Drive" IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. IA-15, NO. 1, JANUARY/FEBRUARY 1979, ROBERT L. STEIGERWALD AND THOMAS A. LIPO
3. "Characteristics of a Current-Fed Inverter with Commutation Applied Through Load Neutral Point" IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. IA-15, NO. 5, SEPTEMBER/OCTOBER 1979
4. "Load-Commutated Inverter Synchronous Motor Drive Without a Shaft Position Sensor" IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. IA-15, NO. 1, JANUARY/FEBRUARY 1979, ALLAN B. PLUNKETT, AND FRED G. TURNBULL,
5. "A Self-Controlled Synchronous Motor Drive using Terminal Voltage System" IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. IA-18, NO. 11, JANUARY/FEBRUARY 1982, HOANG LE-HUY, ALAIN JAKUBOWICZ AND ROBERT PERRET
6. "Dynamic Performance Analysis of Self-Controlled Synchronous Motor Speed Control Systems" IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. IA-18, NO. 3, MAY/JUNE 1982, SHOJI NISHIKATA, SHOICHI MUTO, AND TERUO KATAOKA
7. "Dynamic Control of a Self-Controlled Synchronous Motor Drive System" IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. IA-20, NO. 3, MAY/JUNE 1984, SHOJI NISHIKATA, AND TERUO KATAOKA