

관성부하를 이용한 전동차용 VVVF인버터의 모의주행 및 과도상태시험

정만규* 정기찬 고영철 방이석 서광덕
현대중공업(주) 마북리연구소 전력전자연구실

A Running and Transient state Test of VVVF Inverter using A Inertia Load in Electric car.

Jeong, Man-Kyu Jeong, Ki-Chan Ko, Young-Cheol Bang, Lee-Seok Seo, Kwing-Deok

Hyundai Heavy Industrial Co.,Ltd.
Power Eletronics Research Dept.
Mabookri Research Institute

Absaract

This paper presents a vector control of parallel drive, a beatless control and a low switching PWM technique for the propulsion system of Electric car as transient state which are included interrupting line voltage, changging line vlotage slowly,suddenly, regenerating light load and starting from backward running. Improved performance and a validation of proposed method is shown by the experimental results using a 1.65MVA IGBT VVVF inverter and inertia load equivalent to 160 tons electric cars through a running and transient state test.

1. 서론

전력전자 기술의 발달로 철도차량용 추진제어장치에도 유도전동기와 가변속장치 인버터의 적용이 전적으로 이루어지고 있다. 철도차량용 인버터의 성능시험은 관성부하시험과 현차주행시험으로 이루어지고 있다. 관성부하시험 장치는 차량을 증가의 관성으로 모델링한 장치로서 최근에 국내에서도 이 장치를 이용하여 차량의 모의 주행시험을 통하여 인버터의 성능을 시험하고 있다. 또한 현차조건에서와 같이 가선전압변동시와 회생부하저감시 및 구배구간에서의 기동특성등 과도상태에서도 인버터의 시험이 이루어지고 있다. 이러한 조건하에서도 차량의 안락한 승차감을 위하여 빠른 속응성을 갖는 제어알고리즘이 요구되고 있다. 본 논문에서는 과도상태에 강한 제어알고리즘을 제시하고 관성부하 시험장치를

이용하여 제어알고리즘을 확인하고자 한다.

2. 과도상태에 강한 제어알고리즘

철도차량 추진시스템은 종래에는 슬립주파수제어 방법을 이용하여 인버터의 전류제어를 수행하였다. 그러나 이러한 방법은 과도상태시 전류제어의 추종 시간이 지연되는 현상이 발생하였다. 이러한 단점을 제거하기 위하여 본 시스템에서는 벡터제어를 이용하여 전류제어를 수행하고자 한다. 그러나 대용량의 IGBT는 스위칭주파수가 1kHz 이내로 제한이 되기 때문에 어려운 점이 있다. 또한 한 대의 인버터로 4개의 전동기를 제어하기 때문에 어려움이 더욱 가중된다. 한 대의 인버터로 4대의 전동기를 동시에 제어하는 병렬운전 간접벡터제어와 가선전압변동시 그 변동분을 제어하는 Beatless제어 및 대용량의 IGBT를 구동하는 저주파 동기 과변조PWM방법을 이용하여 과도상태에 강한 제어알고리즘을 제시한다.

2.1 병렬운전 간접 벡터제어

그림1은 추진제어장치의 제어알고리즘이다. 전동기의 견인력을 인버터로 제어할 경우 인버터의 기준전압 V_{M-CON} 이 필요하다. 운전석에서 지령되는 견인력은 토오크 제어기에 의해 승객의 무게를 고려하여 실효치 기준전류 I_{rms}^* 로 계산한다. 실효치 기준전류 I_{rms}^* 의 전동기 1대당 토오크분 기준전류 i_{qse}^* 을 계산하고 실제의 i_{qse} 와의 오차를 PI제어기와 역기전력을 보상하여 q축 고정자 기준전압

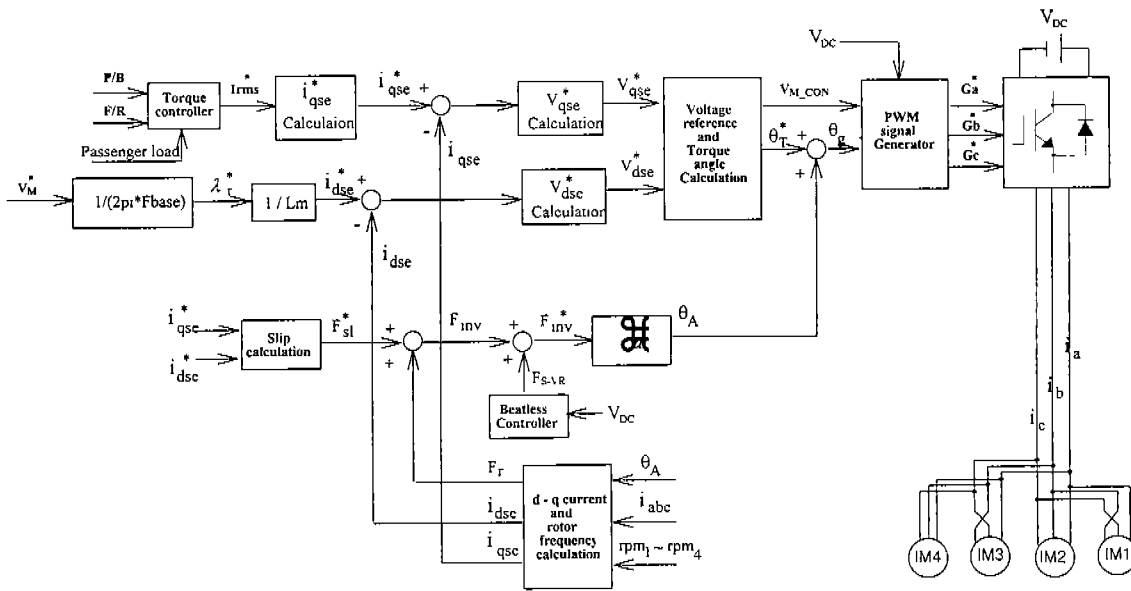


그림1. 추진제어장치의 제어알고리즘

V_{qse}^* 를 계산한다.

고정자 자속분 기준전류 i_{dse}^* 는 고정자 정격전압 V_M^* 을 기준주파수로 나누어 회전자 기준쇄교자속 λ_r^* 를 구하고 상호 인덕턴스 L_m 으로 나누어 구한다. 그리고 실제의 i_{dse} 와의 오차를 PI제어기와 역기전력을 보상하여 d축 고정자 기준전압 V_{dse}^* 를 계산한다. PWM을 위해 필요한 고정자 기준전압 V_{M-con} 과 토오크 각 θ_T 을 계산한다. 슬립 주파수는 자속분 기준전류와 토오크분 기준전류로 부터 계산하고, 인버터주파수 F_{inv} 는 슬립 기준주파수 F_{sl}^* 와 회전자 주파수 F_r 를 합하여 결정된다. 인버터 주파수에 Beatless 제어기의 출력 F_{svr} 을 합하여 인버터 기준주파수 F_{inv}^* 을 구한다. 이 값의 적분으로부터 전류분리를 위한 기준각 θ_A 을 계산한다. 이러한 방식의 간접벡터제어는 슬립주파수제어 보다 빠른 토오크 응답을 얻을 수 있다.[1]

2.2 Beatless제어

가선전압 변동시 필터콘덴서 전압이 흔들리게 되어 이 전압을 가지고 제어를 수행하면 출력전압이 흔들리게 되어 전류의 불평형이 발생하여 토크가 흔들리는 현상이 발생하고, 전동기의 전류가 발산한다. 이를 방지하기 위하여 기준각 θ_A 을 조정하는 Beatless제어를 사용한다. 콘덴서 전압의 변동분을

계산하여 인버터주파수에 더하여 기준각 θ_A 을 조정한다.

2.3 저주파 동기 파변조 PWM 방법

일반적으로 철도차량용 전인전동기는 소형화를 위해 정격전압을 인버터의 출력이 6스텝일 경우로 설계하며, 4대 이상이 병렬 접속되어 운전된다. 따라서 인버터는 파변조제어가 필요하게 되며 6스텝까지 출력 연속성이 보장되어야 한다. 파변조에는 기준전압과 위상은 동일하며 크기만 다르게 표현되는 파변조모드1과 파변조 모드1의 크기가 한계에 도달하면 위상을 달리하는 파변조 모드2가 있다.[2][3]

그림 2는 저주파동기 파변조PWM 방법에 의해 6스텝까지 출력전압이 제어되는 형태를 보인다.

제안한 스위칭 형태는 설계된 스위칭 주파수 한계를 최적으로 활용하며 단일함수로 제어함으로써

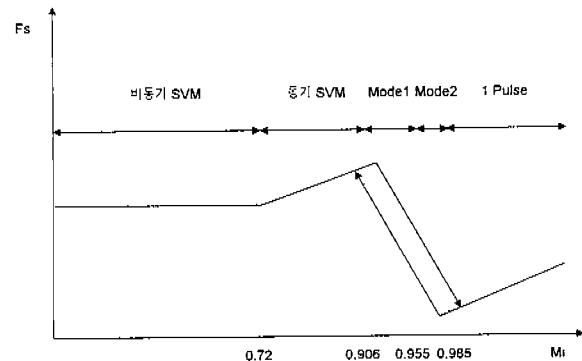


그림 2. 제안된 방법에 의한 PWM 형태 (스위칭 주파수)

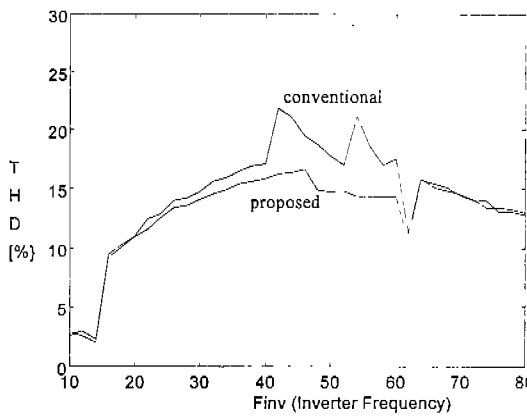


그림 3. 기존방식과 제안된 방식의 고조파 분포비교

고조파를 최대한 억제하고 스위칭 기어현상을 제거하고 출력을 연속적으로 제어할 뿐만 아니라 구현이 간단하다.[4] 그림 3은 기존방식과 제안된 방식에 대해 출력전류에 포함된 고조파 함유율을 기준 주파수에 대해 비교한 것이다. 기존방식은 동기모드에서 패턴에 의한 PWM 발생 방법의 제약상 스위칭을 최적으로 활용치 못함으로써 고조파가 증대되는 것에 반해 제안된 방식은 전반적으로 6스텝일 때의 고조파 함유를 정도로 억제 되어 있다. 따라서 제안된 방식은 추진제어장치의 입출력 필터를 작게 할 수 있으며 시스템의 효율을 증대시킬 수 있다.

3. 실험결과

앞에서 제시한 병렬운전 간접벡터제어, Beatless제어 및 저주파 동기 과변조PWM방법을 철도차량용 추진제어장치에 적용하여 실험하였다. 사용된 시험장치는 그림 4와 같이 구성되며, 1.65MVA급의 IGBT형 VVVF 인버터와 210kW급 견인전동기 4대가 병렬로 구성되었고 부하로는 철도차량 160톤을 등가 모델링한 등가 관성체를 사용하였다. 그림5는 관성부하장치의 외관이다. 관성부하를 이용한 모의주행시험은 차량의 가감속성능과 정상적으로 기동 및 정지가 가능한지를 확인하기 위하여 필요한 시험이다. 가감속 성능시험은 그림 6과 그림7에 나타내었다. 그리고 과도상태시험은 그림 8~그림13에 나타내었다. 그림6과 그림7은 최대가속, 최대감속시의 각부파형이다. 시속 85km/h까지 가속후 off하였고, 75km/h에서 최대감속을 하였다. 기동과 정지 및 우수한 가감속 성능을 확인 할 수 있다.

그림8은 역행시 가선전압차단시의 각부파형이다. 가선전압이 차단되었을 때 보호회로가 콘센서 저전압을 감지하여 PWM을 차단하고, 경고장신호를 출력한다. 그리고 가선전압이 회복되었을 때 자동적으로 다시 기동하는 파형이다.

그림9~그림11은 가선전압변동시 시험파형이다. 가선전압변동은 가선조건과 다른 전동차량의 운전조건에 의해서 발생한다. 가선전압의 완변 및 급변시에도 인버터의 견인력제어 및 전류제어가 원활하게 되는지를 확인하는 시험이다. 그림9는 역행시 가선전압 완변시의 각부파형이다. 가선전압이 1500V~1000V로 5초동안 감소하고 1000V~1500V로 다시 5초동안 상승하는 변화가 있었을 때 시험파형이다. 그림10은 회생시 가선전압 완변시의 각부파형이다. 가선전압이 1400V~1650V로 5초동안 증가하고 1650V~1400V으로 다시 5초동안 감소하는 변화가 있었을 때 시험파형이다. 그림11은 역행시 가선전압 급변시의 각부파형이다. 가선전압이 시속 15km/h에서 1500V에서 1400V로 급변하여 3초동안 1400V를 유지하고 있다가 다시 1500V로 급변한다. 그리고 시속58km/h에서 1400V에서 1200V로 급변하고 3초동안 1200V로 유지하고 있다가 1400V로 급변시 시험파형이다. 이상과 같이 가선전압이 완변,급변하여도 제안한 알고리즘에 의해 견인력제어와 전류제어가 원활하게 수행됨을 볼 수 있다.

그림12는 회생경부하시 각부파형이다. 회생경부하 시험은 회생시 다른 전동차량도 회생을 하던 회생부하량이 감소하게 된다. 이러한 경우 회생되는 전류량을 감소시키지 않으면 가선전압이 상승하여 과전압고장을 발생하여 PWM이 차단된다. 그러므로 회생되는 전류량을 과전압 고장이 발생하지 않도록 인버터가 안정적으로 회생전류량을 제어하는지 확인하는 시험이다. 시속60km/h에서 회생동작을 시작하고, 회생부하 전류량을 350A로 제한하였다. 가선전압이 과전압 검지치 이상 상승하지 않도록 실효치 전류가 제어됨을 볼 수 있다. 회생경부하 조건에 맞추어 전류제어가 원활하게 수행됨을 볼 수 있다.

그림13은 후퇴기동시험이다. 후퇴기동시험은 전동차량이 경사면에 있을 때를 가정하여 전동차량이 기동을 시작하고, 경사면에 의하여 전동차량이 시속 -5km/h까지 후퇴하였을 때 차량이 경사면을 타고 올라가는지를 확인하는 시험이다. 시험조건을 시속 -5km/h까지 역회전시키고, 그 속도에서 정회전시키는 것으로 대체하였다. 속도 0km/h에서 전류의 위상이 변경되면서 전류제어가 원활하게 수행됨을 볼 수 있다.

이상의 결과와 같이 모의주행시험과 과도상태시험시 제안된 제어방법이 우수함을 확인할 수 있었다. 또한 철도차량용 추진제어장치 시스템의 최적설계와 우수한 견인력 제어기법의 적용을 한층 가속시킬 수 있을 것으로 본다.

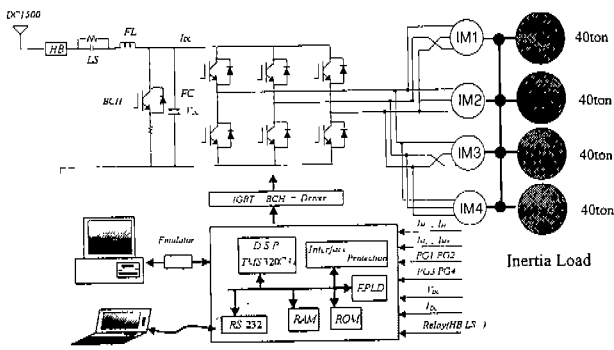
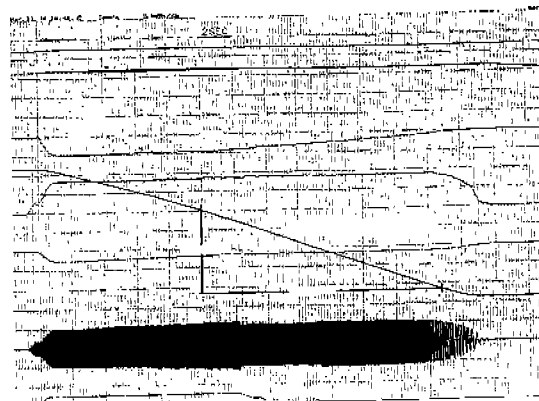


그림 4. 시험장치의 구성



- ①가선전압 [1000V/div] ②펄터전압 [1000V/div]
- ③가선입력전류[600A/div] ④실효전류 [300A/div]
- ⑤슬립주파수 [2.5Hz/div] ⑥차량속도 [10km/h/div]
- ⑦순시전류 [1500A/div] ⑧PWM Mode

그림 7. 감속동작(7S)

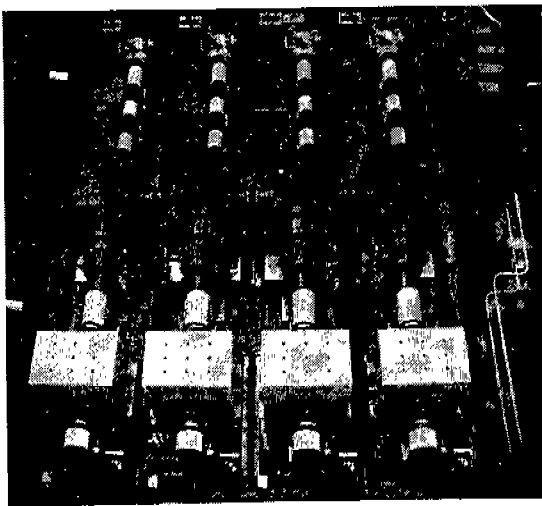
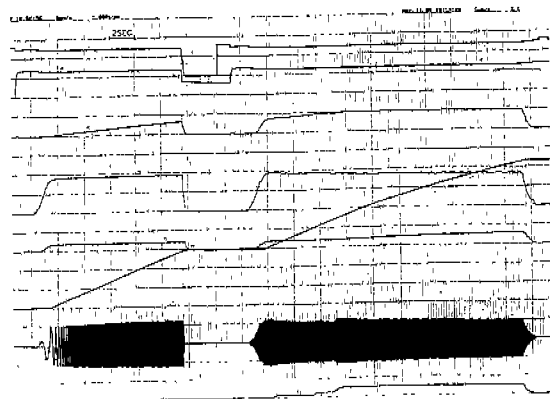
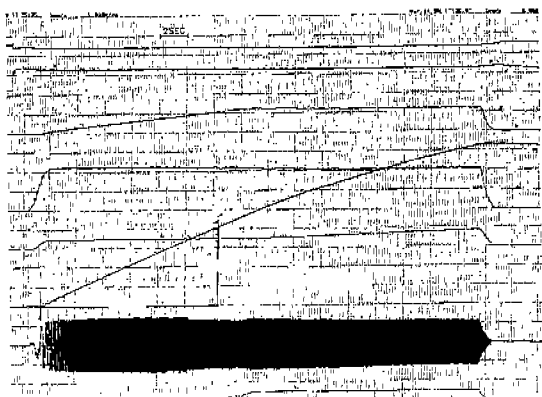


그림 5. 관성부하장치



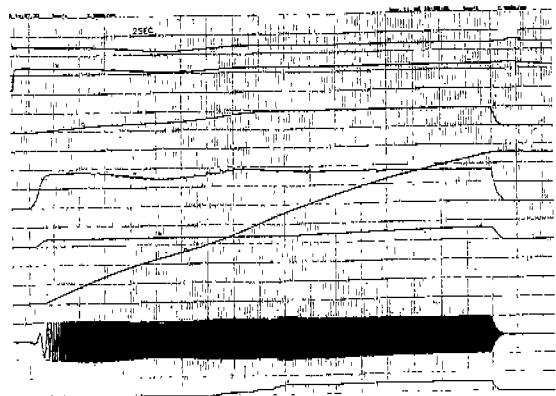
- ①가선전압 [1000V/div] ②펄터전압 [1000V/div]
- ③가선입력전류[600A/div] ④실효전류 [300A/div]
- ⑤슬립주파수 [2.5Hz/div] ⑥차량속도 [10km/h/div]
- ⑦순시전류 [1500A/div] ⑧PWM Mode

그림 8. 가선전압 차단시험(역행시)



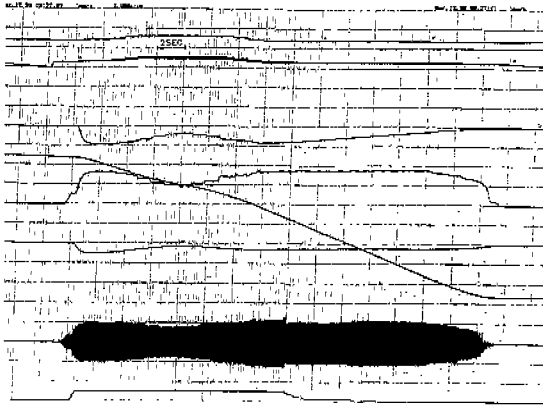
- ①가선전압 [1000V/div] ②펄터전압 [1000V/div]
- ③가선입력전류 [600A/div] ④실효전류 [300A/div]
- ⑤슬립주파수 [2.5Hz/div] ⑥차량속도 [10km/h/div]
- ⑦순시전류 [1500A/div] ⑧PWM Mode

그림 6. 가속동작(4N)



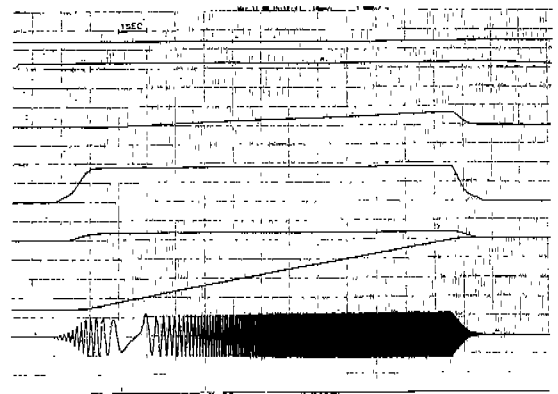
- ①가선전압 [1000V/div] ②펄터전압 [1000V/div]
- ③가선입력전류[600A/div] ④실효전류 [300A/div]
- ⑤슬립주파수 [2.5Hz/div] ⑥차량속도 [10km/h/div]
- ⑦순시전류 [1500A/div] ⑧PWM Mode

그림 9. 가선전압 완전시험(역행시)



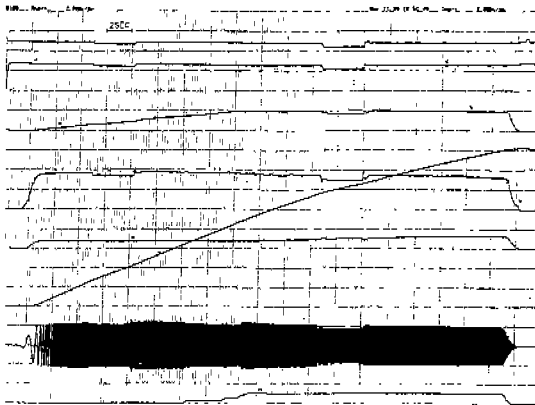
①가선전압 [1000V/div] ②필터전압 [1000V/div]
 ③가선입력전류[600A/div] ④실효전류 [300A/div]
 ⑤슬립주파수 [2.5Hz/div] ⑥차량속도 [10km/h/div]
 ⑦순시전류 [1500A/div] ⑧PWM Mode

그림 10. 가선전압 완전시험(회생시)



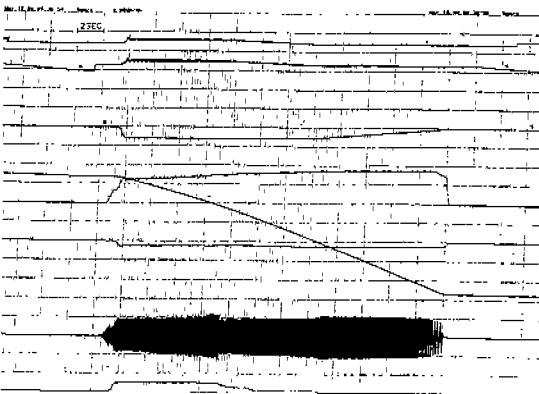
①가선전압 [1000V/div] ②필터전압 [1000V/div]
 ③가선입력신류[600A/div] ④실효전류 [300A/div]
 ⑤슬립주파수 [2.5Hz/div] ⑥차량속도 [10km/h/div]
 ⑦순시전류 [1500A/div] ⑧PWM Mode

그림 13. 후퇴기동시험



①가선전압 [1000V/div] ②필터전압 [1000V/div]
 ③가선입력전류[600A/div] ④실효전류 [300A/div]
 ⑤슬립주파수 [2.5Hz/div] ⑥차량속도 [10km/h/div]
 ⑦순시전류 [1500A/div] ⑧PWM Mode

그림 11. 가선전압 급변(역행시)



①가선전압 [1000V/div] ②필터전압 [1000V/div]
 ③가선입력전류[600A/div] ④실효전류 [300A/div]
 ⑤슬립주파수 [2.5Hz/div] ⑥차량속도 [10km/h/div]
 ⑦순시전류 [1500A/div] ⑧PWM Mode

그림 12. 회생경부하시험

4. 결론

본 연구에서는 철도차량용 추진제어장치의 원활한 견인력 제어특성을 확보하기 위한 병렬운전 간접벡터제어와 Beatless제어 및 향상된 저주파 동기과변조 PWM방법을 제안하였고, 현차에서 발생될 수 있는 과도상태에서 실제 적용시스템인 1.65MVA급의 추진제어장치와 철도차량 160톤을 등가화한 관성부하를 이용한 실험을 수행하여 우수한 특성과 효율성을 입증해 보였다. 또한 저주파 동기 과변조 PWM 방법으로 실질적 응용주파수 범위인 500Hz이하의 낮은 스위칭 주파수로써 6스텝까지 연속전압제어를 수행하고, 고조파의 함유율을 저하시킴으로써 향후 고속철도, 자기부상열차등의 추진제어시스템 최적 설계는 물론 향상된 견인력 제어기법의 적용을 가속시킬 것으로 본다.

참고문헌

[1] D.W.Novotny and T.A.Lipo "Vector Control of Dynamics of AC Drives",pp257-268.
 [2] J.Holtz, W.Lotzat,and A.M. Hhambadkone,"On Continuous Control of PWM Inverter in the Overmodulation Range Including the Six-step Mode", Trans. IEEE. on PE, Vol. 8, No.4, pp.546-553, 1993.
 [3] 이지명,이동춘,최종우,"PWM인버터의 과변조 제어기법", Trans. KIEE. Vol. 46. No.5. , pp712-719, MAY. 1997.
 [4] K.J. Lee, M.K. Jeong, L.S. Bang, K.D. Seo, N.K.Kim,"A Study on the High Performance PWM Technique for a Propulsion System of Railway",Proceedings ICPE'98, pp425-430,1998.