

철도 차량용 APS 병렬 운전 알고리즘 연구

Study of Parallel Synchronous Operation of APS for Railway Vehicles

송민섭^{*†}, 김연총^{*}

Min-Sup Song^{*†}, Yuen Chung Kim^{*}

Abstract Auxiliary power supply (APS) for railway vehicle, consisting of more than two subs, is the key electric component for supplying electric power of vehicle. When one of APS fails, fault one is stopped and disunited from vehicle load. During the extension of power from remaining normal APS, passengers have to endure inconvenience due to temporarily blocked electric power. In this paper, the simple parallel synchronous operation algorithm for APS was propose, with which All APS can operated in parallel at all times resulting seamless power supply to load even during failure of some APS. For minimizing the communication and other external control efforts to implement synchronous operation, simple but effective control algorithm was suggested and verified by PSIM simulation.

Keywords : Auxiliary power supply, parallel synchronous operation, phase control, simulation

초 록 철도 차량용 보조전원장치 (APS, Auxiliary Power Supply)는 차량에 필요한 전원을 공급하는 핵심적인 전장품으로써 차량 편성에 따라 2대 이상으로 구성되어 독립적으로 운영된다. 일부 APS에 고장 발생 시 정상 운영 중인 APS가 연장 급전을 통해서 고장이 발생한 APS의 부하에 임시적으로 전원을 공급할 때 까지 전원이 일시적으로 차단되어 승객에 불편을 초래한다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 2대 이상의 APS가 상시 병렬 운전을 하여 끊임없는 전원 공급을 할 수 있는 APS 병렬 운전 알고리즘에 대해서 연구하였다. 병렬 운전을 위한 통신 및 외부 제어 부담을 최소화 하기 위해 간단하고 효과적인 제어 알고리즘을 제안하고, PSIM 시뮬레이션으로 타당성을 검증하였다.

주요어 : 보조전원장치, 병렬 동기 운전, 위상 제어, 시뮬레이션

1. 서 론

철도 차량용 보조전원장치 (APS, Auxiliary Power Supply)는 가선으로부터 전원을 공급받아 차량의 냉난방기, 출입문, 제동장치, 조명, 통신, 각종 전자장치 등에 필요한 전원을 공급하는 핵심적인 전장품으로써 차량 편성에 따라 2대 이상으로 구성되어 서로 독립적으로 운영된다. 만약 일부 APS에 고장이 발생하였을 때에는 고장이 난 APS는 동작을 멈추고 부하로부터 분리된

† 교신저자: 현대로템주식회사 전장신호연구실 전장품개발팀 (mssong@hyundai-rottem.co.kr)

* 현대로템주식회사 전장신호연구실 전장품개발팀

다. 정상 운영 중인 APS가 연장 급전을 통해서 고장이 발생한 APS의 부하에 전원을 공급할 때 까지 전원이 일시적으로 차단되어 승객에 불편을 초래한다. APS 간 상시 병렬로 연결되어 있는 경우에는 고장이 발생한 APS는 차단하고 나머지 정상적인 APS로 부하에 끊임없이 전원을 공급할 수 있으므로 독립 운전 시의 일시적인 전원 공급 차단 문제를 해결할 수 있다.

APS의 AC 출력을 병렬 동기 운전하기 위해서는 출력 전압의 크기 뿐만 아니라 위상, 주파수를 동기화 하여야 하고, 병렬 운전 시 주요 문제점인 APS간 전류 쏠림 현상을 해결해야 한다. 철도 차량의 경우 무정전 전원장치 (UPS, Uninterruptable Power Supply)나 다른 병렬 분산 시스템과 다르게 전원 장치간 물리적인 거리가 상당하여 동기 운전을 위한 제어 정보를 전달하기 어렵다. 이와 같은 어려움 때문에 APS 병렬 운전의 장점에도 불구하고 아직까지 철도 차량용 APS 병렬 운전 기술 개발이 활발히 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 간단하고 효과적인 APS 병렬 운전의 동작 알고리즘에 대해서 연구한다. 출력 동기를 위한 APS간 정보 교환을 최소화한 독립 제어 방식의 알고리즘을 채택하여 외부 통신 및 제어 부담을 줄였다. 알고리즘의 타당성을 확인하기 위해서 Master와 Slave로 구성된 2 병렬 300kW급 APS에 대한 PSIM simulation을 수행하였다.

2. 본 론

2.1 제안하는 APS 병렬 운전 알고리즘

2.1.1 기존 방식과 제안 알고리즘의 차이점

기존의 AC 병렬 제어 기법의 경우 위상 동기화를 위해 Master 출력 전압의 위상 및 크기, 상 전류 정보 등을 통신을 통해 Slave로 전달하고 Slave는 Master로부터의 정보를 이용하여 Master를 추종하여 동작하는 방식을 많이 사용하였다 [1]. 하지만, 이렇게 정보를 전달하기 위해서는 고속의 통신이 필요하고 철도 차량의 경우 APS간 물리적인 거리가 수십 미터에 달할 정도로 상당하여 긴 통신 라인으로 인한 작업의 어려움과 통신 도중의 노이즈 발생 등 구현이 어려운 단점이 있다.

본 연구에서는 출력 동기화를 위한 통신 등 외부 제어 부담을 최소화하기 위하여 동일한 제어 루틴을 Master와 Slave가 각각 수행하도록 한다. 즉, Master로부터의 지령을 통신을 통해 전달받는 과정 없이 Slave도 Master와 같이 공통 출력 전압을 센싱하여 위상을 추종하고 전압 제어기, 전류 제어기를 통해 PWM 신호를 Gate로 출력한다.

2.1.2 위상 동기화 및 스위칭 제어 알고리즘

제안하는 APS 병렬 운전 알고리즘은 Fig. 1에 보는 바와 같이 크게 abc-to-dq 좌표 변환, 위상 추종을 위한 Phase Locked Loop (PLL), 전압 제어기, 전류제어기로 구성되어 있다. Master와 Slave의 공통 출력인 3상 선간 전압 V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} 을 Band Pass Filter (BPF)를 거쳐서 60Hz 기본파 성분만 추출하고, abc-to-dq 좌표 변환을 통해서 고정 좌표축 전압 V_{ds} , V_{qs} 를 생성한다. 고정 좌표축 전압을 동기 좌표축으로 변환하고 q축 전압 성분을 0으로 제어하면 추정 위상 $\hat{\theta}$ 가 출력 전압

위상 θ 와 같아진다 ($\hat{\theta} = \theta$) [2]. 앞서 설명한 전압 관계식은 아래 식(1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 V_{ab} &= V_m \cos \theta \\
 V_{bc} &= V_m \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right), & V_{ds} &= V_m \cos \theta & V_{de} &= V_m \cos(\theta - \hat{\theta}) \approx V_m \\
 V_{ca} &= V_m \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right), & V_{qs} &= V_m \sin \theta, & V_{qe} &= V_m \sin(\theta - \hat{\theta}) \approx 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

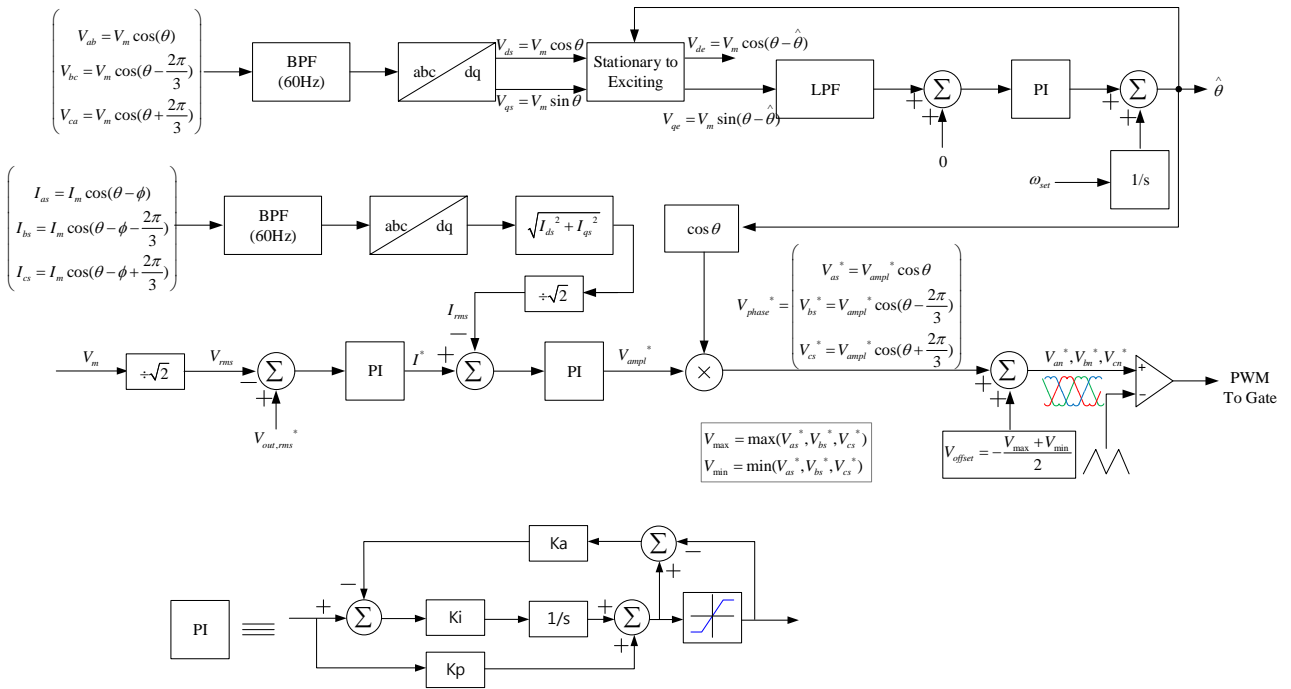


Fig.1 Control algorithm diagram for proposed parallel synchronous operation

위 과정에서 얻은 출력 전압의 크기 V_m 을 이용하여 전압 제어를 하고, 그 결과를 전류 제어기의 지령 I^* 으로 하여 전류 제어기를 구성한다. 또한, 전류 제어기의 출력을 상전압의 크기로 두고 앞서 구한 위상 정보 $\hat{\theta}$ 를 이용하여 3상 상전압 V_{phase}^* 을 생성한다. 마지막으로 공간 벡터 변조 방식 [3]을 이용하기 위해 offset 전압을 더하여 극전압 지령치 $V_{an}^*, V_{bn}^*, V_{cn}^*$ 를 만들어서 삼각 반송파와 비교하여 스위치의 Gate에 PWM 신호를 출력하게 된다.

2.1.3 동작 시퀀스

동작 시퀀스를 살펴보면 다음과 같다. 우선, Master가 동작하고 있는 동안 외부 상위 제어기로부터 Slave를 동작시키라는 명령이 입력되면 Slave는 출력 contactor를 open 시킨 상태에서 공통 출력 전압 정보를 센싱하여 위상을 추정하고, 미리 정해놓은 출력 전압을 맞추기 위해서 전압,

전류 제어를 시작한다. 공통 출력 전압과 Slave의 contactor 앞단 출력 전압이 동기화되었을 때 출력 contactor를 close하여 AC 병렬 운전을 시작한다. Slave는 처음 무부하 상태에서 전류 제어가 동작하였으므로 병렬 운전 초기에는 Master와 Slave의 상전류가 차이가 나지만 일정 시간이 지나면 제어기가 안정화되어 부하 전류 분담도 동일하게 된다. 만약 AC 병렬 운전 중 Master에 고장이 발생했을 경우에는 Slave가 Master 역할을 하고 Master는 Slave 역할을 하면서 위 동작을 똑같이 수행한다. 즉, 제안하는 알고리즘에서는 공통 출력 전압, contactor 앞단 전압, 상전류, Master/Slave On/Off 신호를 바탕으로 각각 독립적으로 운전하면서 동일 출력 전압을 맞추기 위해 동작하면서 자연스럽게 부하 분담도 이루어지는 것이다. 즉, Master와 Slave간의 직접적인 통신은 불필요하고 다만, 열차 종합 관리 장치 (TCMS)와 같은 상위 제어기로부터의 On/Off 신호만 필요하다.

요약하면 각 APU는 공통 출력 전압을 기준으로 위상 추종을 하기 때문에 결국 각 APU는 동일한 전압 위상을 추종하게 되고, Master/Slave의 각 제어기가 시간이 지남에 따라 점차 포화되어 초기 부하 편차가 점점 줄어든다.

2.2 APS 병렬 운전 Simulation

2.2.1 Simulation 회로

제안하는 알고리즘을 검증하기 위하여 Fig. 2와 같이 2 병렬 APS 회로를 구성하였다. 입력은 DC 700V를 가정하여 3상 전압형 Inverter를 Master와 Slave에 각각 구성하고 각 출력단에는 LC 저역 필터를 추가하여 고주파를 제거한 후, contactor를 통해 부하와 연결되어 있다. Master와 Slave의 제어 알고리즘은 각각 Master.dll과 Slave.dll에 포함되어 있고 Master, Slave간 직접적으로 연결된 신호는 없다. 병렬운전 시 하나의 APS에 고장 발생하면 나머지 APS가 부하 전체를 감당해야 하므로, APS의 용량 및 크기가 불필요하게 커지는 단점이 있다. 따라서, 고장 발생 시 자동으로 부하 반감을 하도록 가정하여 APS의 용량을 선정하였고, 이에 맞게 contactor 및 동작 시퀀스를 조절하였다.

2.2.2 Simulation 결과

Fig. 3과 Fig. 3을 확대한 Fig. 4에는 300kW급으로 설계한 2 병렬 APS에 대한 simulation 결과를 보여주고 있다. Contactor 동작 상태, Master/Slave 전압 위상, 공통 출력 전압, Master 전압, Slave 전압, Master와 Slave의 각 상전류가 포함되어 있다. 동작 시퀀스는 Master를 먼저 동작시킨 후, simulation time 0.5초에서 Slave On 신호를 입력 받고, 다시 1.5초에서 Slave Off 신호를 입력 받고, 다시 2초에서 Slave On 신호를 입력 받는다. Slave가 On 된 후 출력 전압의 한 주기 (=16.6ms) 안에 Master 위상을 추종하고 있는 것을 확인할 수 있다. 또한, Slave contactor On/Off 시 공통 출력 전압의 distortion도 만족할 만한 수준이고, 상 전류도 초기에는 오차가 있지만 제어기가 안정화되면서 그 편차가 감소하는 것을 확인할 수 있다.

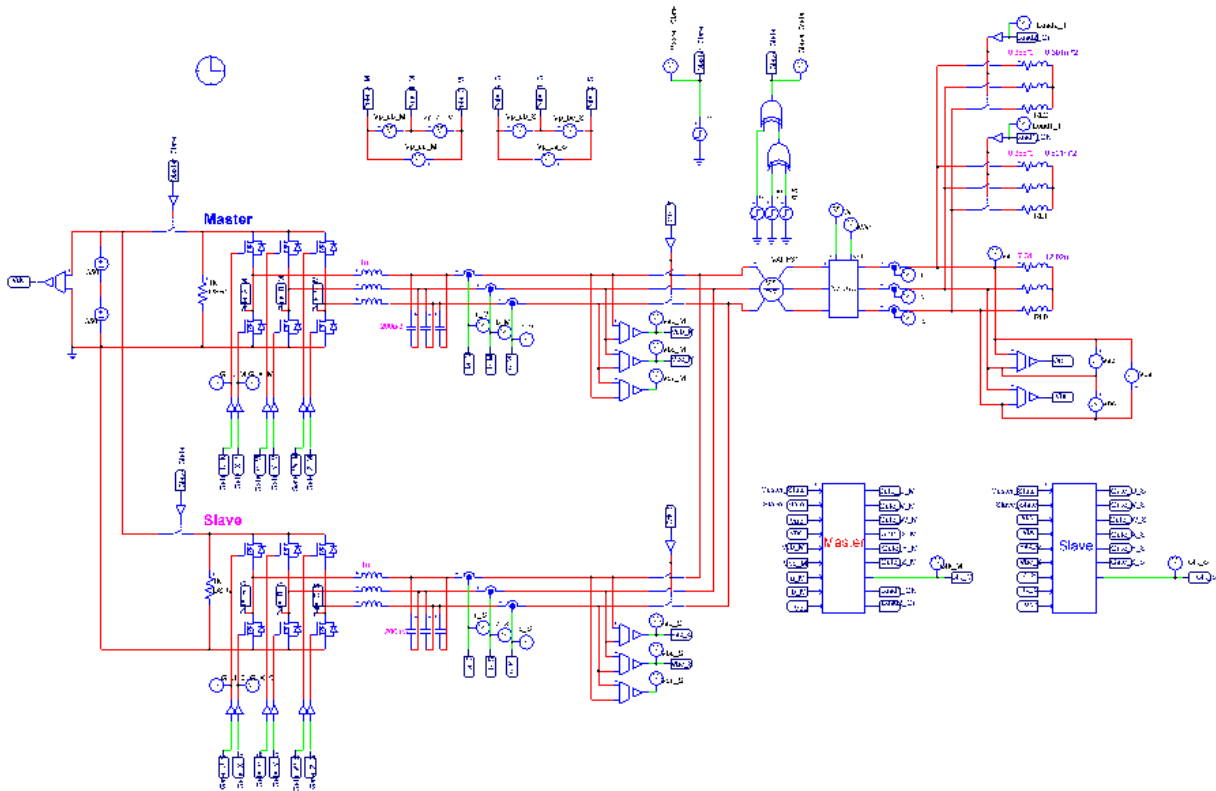


Fig.2 Simulation circuit diagram for proposed APS parallel synchronous operation algorithm

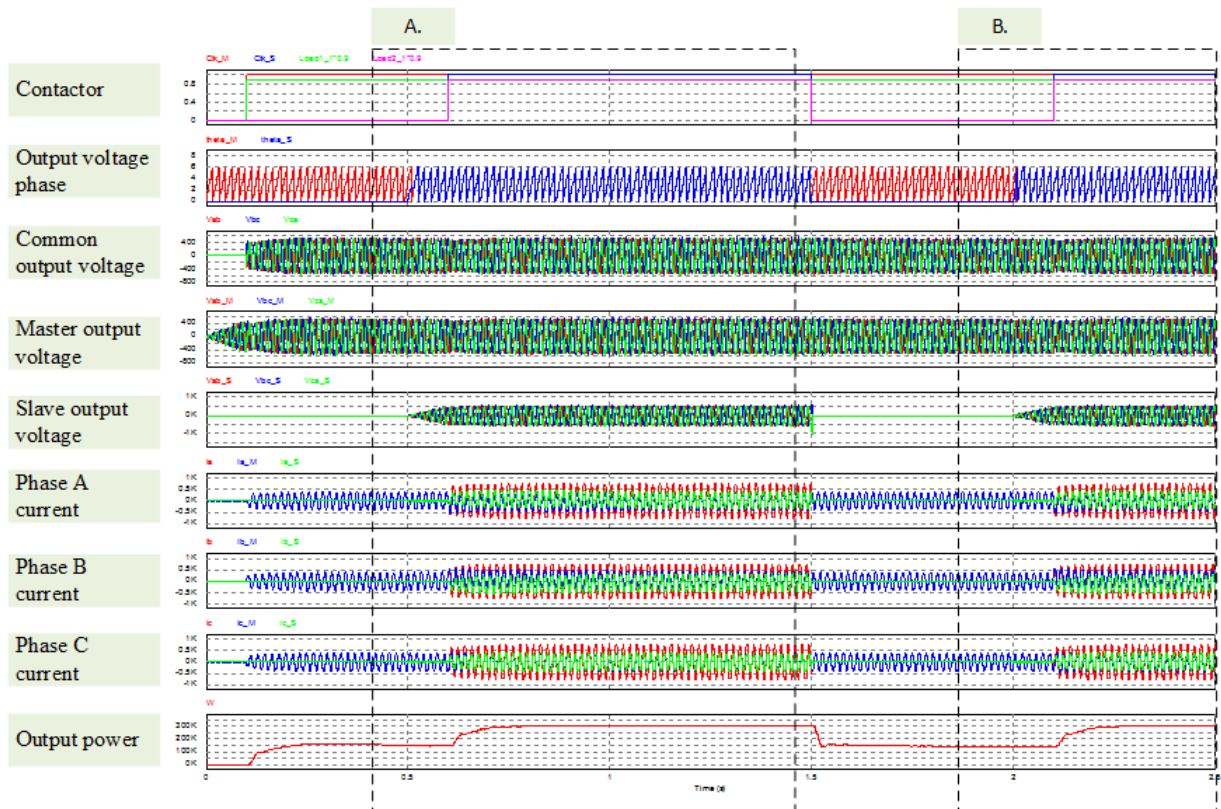


Fig.3 Simulation results

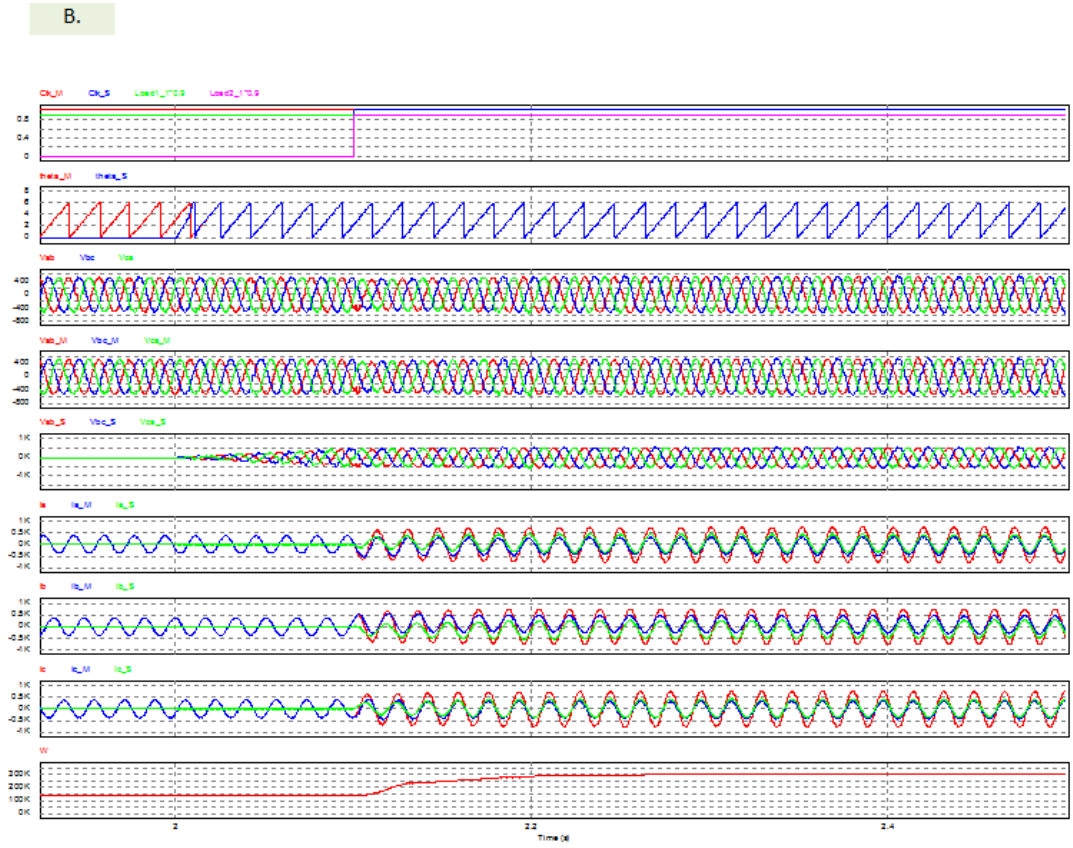
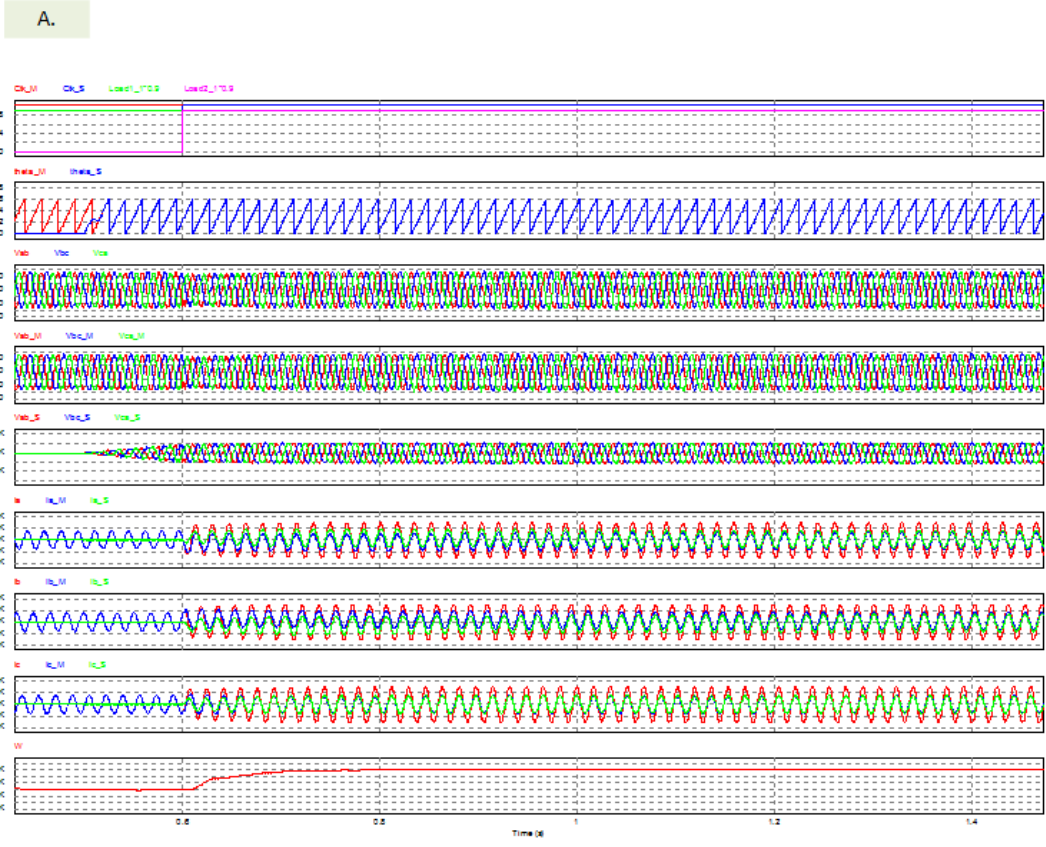


Fig.4 Enlarged Picture of Fig. 3

3. 결 론

본 논문에서는 간단하면서 효과적인 철도 차량용 APS 병렬 운전 알고리즘을 제안하였다. 출력 전압 동기화를 위한 외부 통신 및 제어 부담을 최소화하기 위해서 병렬 운전되는 각 APS를 독립적으로 동작시킴으로써 위상 동기화 및 전류 분담을 효과적으로 할 수 있는 알고리즘을 제안하고 타당성을 확인하였다.

참고문헌

- [1] 정상혁, 정아진, 김주하 외 (2012) 태양광 발전을 위한 NPC 인버터의 병렬 운전, 전력전자학회, 전력전자학술대회논문집, pp. 57-58.
- [2] 김상훈 (2014) 모터제어-DA, AC, BLDC, 북두출판사, chapter. 5.
- [3] K. Zhou and D. Wang (2002) Relationship between space-vector modulation and three-phase carrier-based PWM: A comprehensive analysis, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 49(1), pp. 186–196.