

고주파 공진형 전력변환 시스템 설계방법에 관한 연구

이용중* · 양승학** · 이양범*¹⁾
전기공학과

〈요 약〉

본 연구에서는 고성능 공진형 전력변환기의 실용화를 위해 병렬공진형 직류링크 전력변환 시스템의 설계방법을 제안하였다. 제안된 시스템은 기존의 반도체형 전력 스위칭 소자에 비하여 제한적인 주파수 영역을 극복할 뿐만 아니라 전력손실량도 최소화 시켰다. 또한 이 시스템의 실용화를 위하여 시스템의 설계방향, 공진회로부의 구성부품, 그리고 주회로의 각 소자에 대한 설계사양도 함께 고려하였다.

A Study on the Design Methodology of High Frequency Resonant Power Converter System

Yong-Joong Lee · Seung-Hak Yang · Yang-Bum Lee
Dept. of Electrical Eng.

〈Abstract〉

In this study, a design technology of the parallel resonance type DC-link power converting system is proposed to apply high-active resonance type power transducer in the industrial field. The proposed system not only alleviates the frequency limitation which is major drawback of the semiconductor type power switching device but also reduces the power loss. To realize the proposed system, we considered system design procedure, resonance circuit components, and design specification of each device of main circuit.

1)* 울산대학교 전기공학과
** 동경대학교 산업기술연구소

I. 서 론

최근 시스템의 고효율화, 소형화, 고신뢰성의 요구로 인하여 각 방면에서 고주파 영전압(또는 영전류)스위칭을 특징으로 하는 공진형 전력변환 기술을 3상변환기에 적용하는 연구가 활발히 행하여 지고 있다.〔1〕〔2〕〔3〕〔4〕〔5〕 이와 같은 전력변환기의 고성능화를 위해서는 스위칭주파수의 고주파수화가 필요 불가결하다. 그러나, 종래에는 전력형 반도체 소자를 강제적으로 온-오프(On-Off)시킴으로써 스위칭 손실이 발생하고 이로 인하여 동작 주파수가 제한되어 있었다.

따라서 최근에 공진 현상을 이용하여 전압(또는 전류)이 영이 되는 시점에서 반도체 소자를 스위칭하는 공진형 전력변환 시스템이 개발되었으며 또한, 이 시스템은 스너버 회로를 필요로 하지 않고, 스위칭 손실을 대폭 절감할 수 있으므로 종래의 PWM형에 비하여 높은 스위칭주파수로 운전할 수 있는 특징을 갖고 있다.

입력측 컨버터와 출력측 인버터로 구성되는 듀얼 컨버터 방식의 중간 링크부를 공진형으로 한 전력변환기는 4종류가 있다. 즉, 링크부 전압 및 전류의 극성에 의해 직류링크, 직류링크로 구별하고 공진회로의 접속 방식에 의해 직렬공진, 병렬공진으로 분류되어 각각을 조합하여 4종류가 존재한다.〔6〕

이중에서 유도기의 4 상한 운전, 입력역율의 제어를 목적으로 하고, 앞으로 일반산업체의 적용을 고려하여 병렬형 직류링크 방식에 대하여 연구를 위해 실제로 고주파공진형 직류링크 컨버터와 인버터 시스템을 구축한 뒤, 정상상태와 과도상태에서 구동, 회생운전을 실현하여 보고 되었다.〔7〕〔8〕 또한, 제작한 병렬공진형 직류링크 전력변환기에서 발생하는 손실을 정량적으로 평가하고 그러한 손실과 공진파라메타의 관계를

규명한 관계도 보고되었다.〔9〕

본 논문에서는 고성능 공진형 전력변환기의 실용화를 위해 지금까지 행한 실험을 근거로 하여 병렬공진형 직류링크 전력변환시스템의 설계방법에 대하여 논한다. 즉, 본 시스템의 설계방법, 공진회로의 구성부품, 주 회로의 각 소자에 대한 설계사양에 대하여 실용화의 관점으로 부터 기술한다. 또한, 본 시스템에 대한 연구에 있어서 해결해야 할 과제를 열거하여 연구의 방향을 제시하고자 한다.

II. 시스템 구성

그림 1은 제작한 시스템의 구성도이다. 컨버터와 인버터는 3상 브릿지회로로 구성하고 스위칭 소자로서는 IGBT를 사용하고 있다. 중간 링크부는 공진현상을 발생시키기 위한 공진콘덴서(Cr)와 공진리액터(Lr), 에너지 버퍼용의 전해콘덴서(Cd) 및 클램프회로로 구성한다. 또한, 계통부에는 전원함몰방지용의 교류리액터(Lac)가 접속되어 있다.

컨버터와 인버터의 스위칭은 링크부 전압이 영으로 되는 시점에서 이루어 지고, 스위칭 패턴은 지령치와 검출치의 순시치 비교로 부터 발생시킨다. 컨버터는 전해콘덴서 전압을 일정하게 하는 제어와 입력역율을 1로 하는 제어를 행한다. 인버터는 유도기의 1차접속을 일정하게 하는 제어를 수행하며 또한 공진현상으로 인한 링크부 전압은 직류전원전압의 2배 이상으로 되므로 이 고전압을 억제하기 위하여 클램프회로를 부가한다.

III. 병렬공진형 직류링크 전력변환 시스템의 설계방법

1. 시스템의 설계방법

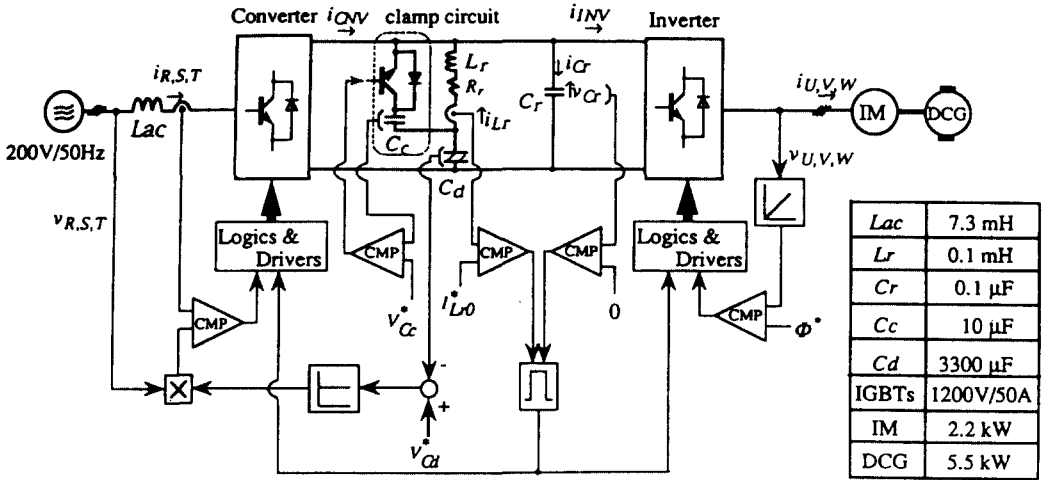


그림 1. 제작시스템의 구성도

1) 교류리액터 (Lac)

일반적으로 교류리액터는 노이즈절감 및 컨버터제어에 의한 전원함몰방지용으로 접속하고 있으며, 그의 용량은 허용 전류리플의 크기에 의해 결정하고 있다.

본 시스템에서는 공진현상의 지속이라는 관점에서 교류리액터에서의 역할은 중요하다. 공진회로에서 본 경우, 전원부 및 부하부의 임피던스는 공진콘덴서와 병렬로 접속되어 있으므로 임피던스값이 무한대이면 공진회로에 영향은 전혀 미치지 않지만, 실제로는 유한한 값이기 때문에 다소의 영향을 받게 된다. 이 때문에 변환기의 입력부에 교류리액터를 접속하는 것은 임피던스를 높게 하는 것이고 안정된 공진현상에 기여하게 된다.

또한, 부하부에 있어서는 모타의 누설인덕턴스만이 인덕턴스 성분으로 되므로 이 값이 작은 경우에는 교류리액터를 설치할 필요가 있으며 손실 및 용적면을 무시하면 인덕턴스값이 큰것을 적용하는 것이 일반적으로 무난하다.

2) 스윗칭주파수

스윗칭주파수와 입출력의 리플전류 사이에 상관관계가 있듯이, 스윗칭주파수는 컨버터와 인버터의 제어성능을 결정하는 대단히 중요한 변수이다. 이는 시스템 성능을 향상시키기 위해서는 스윗칭주파수를 올리는 것이 필요불가결하다는 의미이다. 특히 공진형변환기의 경우는 스윗칭타이밍에 제약이 있기 때문에 스윗칭주파수를 올리는 것은 중요한 과제중의 하나이다.

스윗칭주파수를 올리는 방법을 주 회로부의 관점에서 조사하면, ① 공진초기전류 (i_{Lr0})를 평균적으로 작게, ② 공진 리액터 또는 공진콘덴서 용량을 작게, ③ 클램프회로부의 클램프콘덴서 전압을 높게 하는 것을 생각할 수 있다. 그러나 상호간에 트레이드 오프(trade off)가 있으므로 설계시에는 이를 고려할 필요가 있다.

그림 2는 스윗칭주파수와 클램프콘덴서 전압의 관계를, 그림 3은 클램프회로를 부가한 경우의 스윗칭주파수와 공진초기전류의 관계, 그림 4는 클램프회로를 부가하지 않은 경우의 스윗칭주파수와 공진초기전류의 관계를 공진콘덴서와 공진리액터를 파라메타로 하여 표시한 것이다.

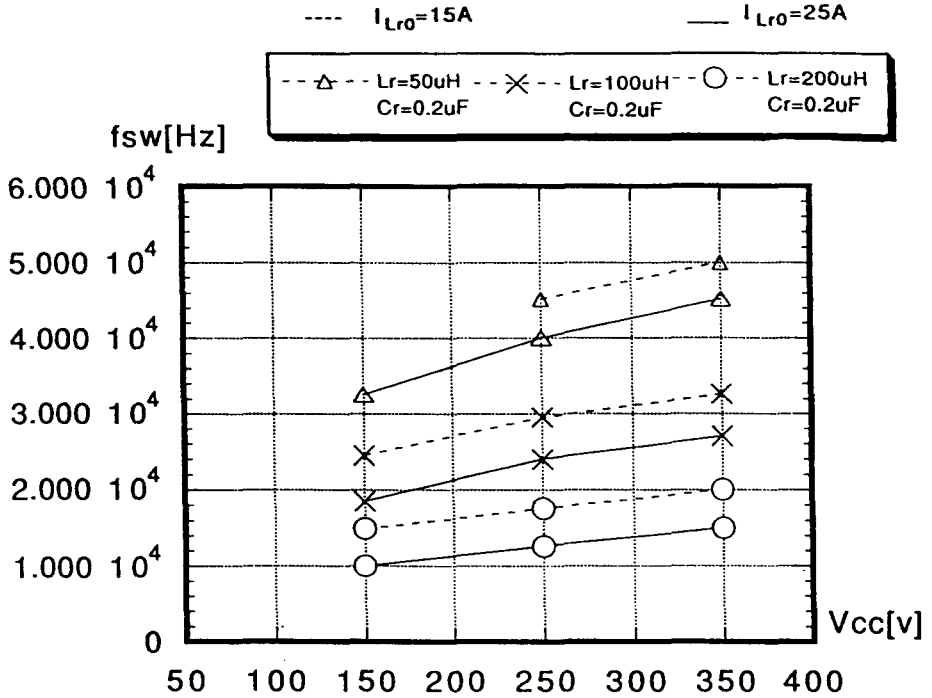


그림 2. 스위칭주파수와 V_{cc} 특성

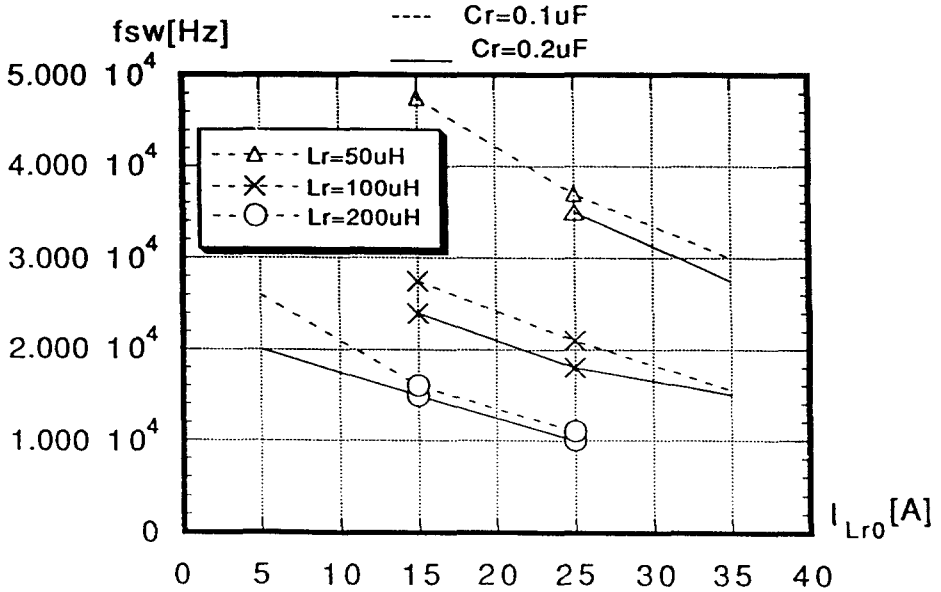


그림 3. 스위칭주파수와 i_{Lr0} 특성

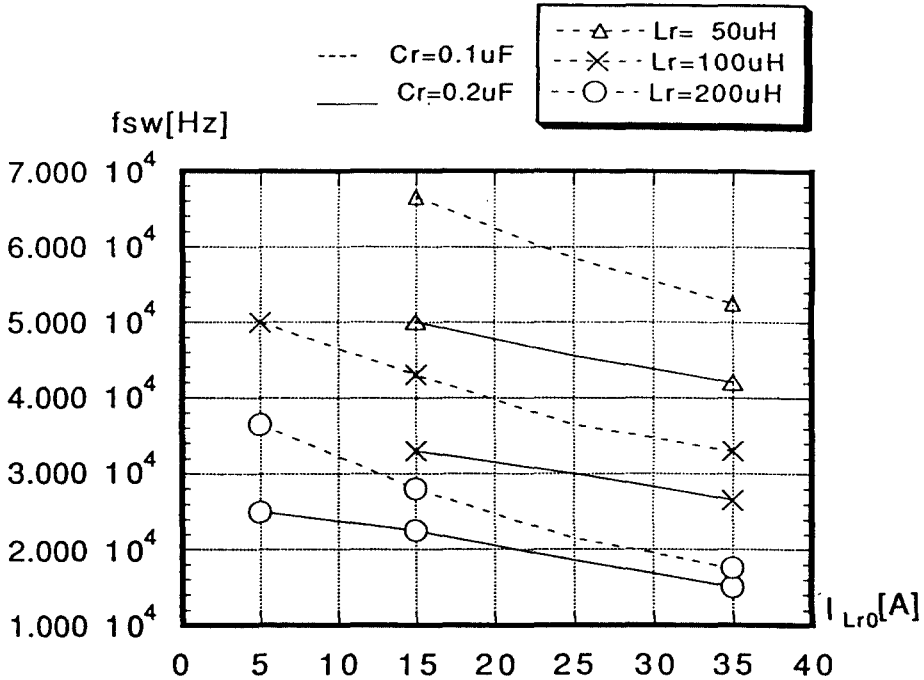


그림 4. 스윗칭주파수와 i_{Lr0} 의 특성(클램프회로를 부가하지 않은 경우)

3) 클램프콘덴서전압(V_{cc})

그림 2에 나타난 바와 같이 V_{cc} 가 높은 정도에 따라 스윗칭주파수가 높게 되는 경향이 있다. 더욱 클램프회로를 부가하지 않은 경우는 가장 높은 스윗칭주파수를 얻게된다.

그림 5는 V_{cc} 와 공진회로부 손실과의 관계를 나타내고 있다. 공진회로의 손실치가 V_{cc} 에 크게 의존하지 않는 것으로 생각되지만, 공진리액터가 작으면 V_{cc} 를 높게 한 만큼 손실치는 크게되는 경향이 있다. 이것은 V_{cc} 를 높게 하므로써 얻어지는 스윗칭주파수의 상승률이, 공진리액터가 작은 만큼 되기 때문인 것으로 생각된다.

4) 공진파라메타(L_r, C_r)

공진형 변환기를 설계함에 있어서, 공진리액터와 공진콘덴서 용량을 정하는 것은

대단히 중요하며 어렵다. 이것은 L_r 과 C_r 에 의해 스윗칭주파수, 공진초기전류, 공진회로부의 피크전압치 및 피크전류치, 각부의 손실치, 스윗칭시의 dv/dt 및 di/dt 등이 서로 영향을 주고 있기 때문이다. 따라서 각각의 관계에 대하여 정량적으로 평가하는 것은 대단히 어렵다고 생각된다. 표 1과 표 2는 실험 및 시뮬레이션으로 부터 얻은 데이터를 이용하여 정성적으로 분석한 결과를 기술한 것이다.

방 법	결 과
공진콘덴서를 작게	턴오프 손실 증가 다이오드 도통 손실 증가 공진 지속성 능력 저하
공진콘덴서를 작게	공진부 손실증가 구성부품의 전류용량 증대
클램프전압을 크게	고내압 소자가 필요

표 1. 스윗칭주파수를 올리기 위한 방법

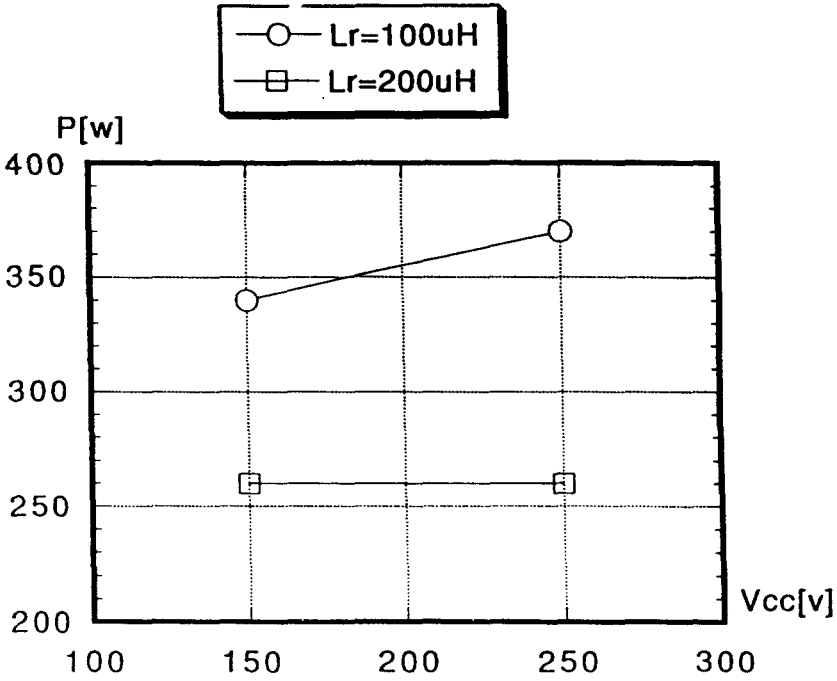


그림 5. 공진회로부 손실과 Vcc특성

공진콘덴서가 크고, 공진리액터가 작으면	
원 인	결 과
공진리액터 전류가 크게되어	내부 저항에 의한 공진부 손실 증가
턴오프시에 dv/dt 감소	턴오프 손실 감소
공진지속 능력이 향상	
공진콘덴서가 작고, 공진리액터가 크면	
원 인	결 과
공진리액터 전류가 작게되어	내부 저항에 의한 공진부 손실 감소
턴오프시에 dv/dt 증가	다이오드 도통 손실 감소
	턴오프 손실 증가

표 2. 동일한 스윗칭주파수의 경우

표 1과 표 2에서 알수 있는 바와 같이 스윗칭주파수를 올리기 위해서는 여러가지 문제점이 발생되고 시스템효율에도 악영향을 주게 된다. 설계면에서는 특성임피던스를

크게하는 Lr, Cr을 선택하는 것이 일반적
으로 무난할 것이다.

5) 전해콘덴서(Cd)

전해콘덴서의 정전용량은 일반적으로 콘

덴서에 유출입하는 전류의 실효치에 의해 결정한다. 본 시스템에서 이 전류성분은 다음과 같이 분해할 수 있다.

- (1) 콘버터의 스윗칭에 의한 리플전류
- (2) 인버터의 스윗칭에 의한 리플전류
- (3) 공진회로부에 흐르는 공진전류

PWM형 변환기에서는 (1) (2)의 전류성분만인 것에 대해, 공진형 변환기의 경우에는 (3)의 전류성분이 추가된다. 동일한 용량의 시스템이면, 공진형 변환기에서 큰 정전용량의 전해콘덴서를 필요로 하게 된다. 문제가 되는 공진전류의 실효치는 공진파라메타로 결정되는 특성임피던스가 작을수록 크게 되므로 용량을 선정할 때는 공진파라메타의 값도 고려할 필요가 있다.

6) 클램프회로부의 클램프콘덴서(Cc)

클램프콘덴서의 정전용량은 클램프콘덴서의 설정전압에 대하여 허용 가능한 전압의 상승분에 의해 선정한다.

그러나, 본 시스템의 운전시, 차분전류가 크게 되는 동작모드의 변화가 발생하면 Cc에 높은 전압이 인가되므로, 이 점에 있어서 주의할 필요가 있다.

여기에서 차분전류란, 영전압기간 중에 공진리액터에 흐르는 전류와 공진초기전류 설정치의 차분을 말한다.

2. 공진회로부의 구성부품

1) 공진리액터(Lr)

공진리액터는 시스템에 있어서 대단히 중요한 구성부품이다. 이 리액터는 내부저항을 갖는 가능성이 많으므로 시스템의 고효율화 및 고주파수화를 저해하고 있는 최대의 요인이 되고 있다. 또한, 공진주파수가 높아짐에 따라 표피효과에 의한 저항성분의 증가를 초래한다.

공진리액터의 사양으로써, 코일은 릿츠선을 사용하고 고주파특성을 좋게 하기위한 공진구조 및 페라이트, 아몰퍼스등의 특수

재료의 코어를 적용하여 가능한 한 동손이 발생하지 않도록 된 것을 선정한다.

2) 각 콘덴서(Cr, Cd, Cc)

공진리액터와 동일하게 내부저항이 작고, 고주파특성이 좋은 대전류용량과 내전압의 것을 선정한다.

3. 적용소자의 사양

PWM형 변환기에서 사용되는 스윗칭소자와는 달리, 공진형 변환기에 적용되는 스윗칭소자는 스트레스에 강한 성질이 요구되고 있다. 효율 향상을 위해서도 고주파공진 전용의 스윗칭소자가 필요하다고 생각된다.

1) 트랜지스터

공진형변환기에서는 클램프회로를 부가하지 않은 경우는 말할 필요없고, 직류링크부의 피크전압이 높게 되므로 내압이 높은 것이 필요하다. 또한, 영 전압시에 트랜지스터에는 수십볼트 정도의 역 극성전압이 인가되므로, 이 전압에 견딜 수 있는 것이 필요하다. 반면, 턴 오프시의 폴(fall)기간 중, 소자에 인가되고 있는 전압은 거의 영볼트이므로 전류가 영에 달할 때까지 다소의 시간이 걸리더라도 손실로서는 큰 영향을 끼치지 않는다. 또한, 공진형변환기에서는 RBSOA를 배려할 필요가 없다. 온전압의 저압화등은 PWM형 변환기에서 적용하는 동일사양이 필요하다.

2) 다이오드

트랜지스터와 동일하게 다이오드도 높은 내압의 것이 필요하다. 또한, 전류가 다이오드에 전류할 때, 대단히 높은 과도 온전압에 의해 커다란 손실이 발생하고 있으므로 효율향상을 위해서도 고주파 특성이 좋고 순전압강하가 작은 소자가 필요하다. 반면, 공진형 변환기에서는 역회복 동작이 발생하지 않으므로, 소자를 설계할 때에 회복

시간은 고려할 필요가 없다.

IV. 연구의 방향

다음은 해결해야 할 과제를 열거하여 연구의 방향으로서 기술한다.

- (1) 공진형 전력변환기에서는, 소자전류(전압)의 피크치 및 실효치가 종래의 PWM형에 비하여 크기 때문에 그에 준하는 정격의 소자가 필요하게 된다. 따라서 클램프회로를 부가하여 피크치를 억제하는 보고도 있지만, 손실면을 고려하여 클램프회로를 부가하지 않는 회로구성으로 피크치를 억제할 수 있는 제어방향을 생각할 필요가 있다.^[13] 또한, 도통손실을 절감하기 위해서도 낮은 온 전압소자의 개발이 요구된다.
- (2) 종래의 PWM형에 비해 동작모드가 복잡하여 해석이 어렵다. 공진형 컨버터의 해석 방법에 대해서 발표된 논문이 있으나,^[11] ^[12] 고주파가 혼합된 시스템해석의 일반적인 수단인 특이성동법을 적용하여 상태평균화법의 일반화를 고려할 필요도 있다. 특히, 저 주파수 모드의 전달함수 모델이 도출되면 출력제어기의 설계법을 제시하는데 유용할 것이다.
- (3) 공진형에서는, 스위칭 타이밍제어의 자유도가 감소한다. 종래의 PWM형에서는, 온오프동작을 자유로이 제어할 수 있으나, 공진형에서는 스위칭손실의 절감을 위해 어느 한 편이 자유로이 제어할 수가 없게 된다. 즉, 전류공진에서는 오프의 타이밍은 전류가 영이 되는 시점으로 제한된다. 한편, 전압공진에서는 온의 타이밍은 전압이 영이 되는 시점으로 제한된

다. 이와 같이 공진형에서는 제어타이밍이 공진에 의해 시간 이산화되므로 PWM형과는 다른 제어방식을 검토할 필요가 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 고주파공진형 전력변환시스템의 설계방법 및 연구의 방향에 대하여 기술하였다. 고속스위칭 소자를 이용한 PWM형 전력변환기에서는, 스위칭손실의 증가, 전자노이즈 발생등의 문제가 발생한다. 따라서, 종래의 하드스위칭 방식에서 소프트스위칭 방식의 이행은 그의 대책으로서 고려할 수 있다.

공진형 전력변환시스템에서는 본 연구에서 대상으로한 병렬공진형직류링크 변환기 이외에도 서론에서 기술한대로 여러가지 회로방식이 존재한다. 직류링크방식보다 높은 주파수에서 스위칭이 가능한 교류링크방식에 대해서도 연구하여 모든 공진형 전력변환 시스템을 비교할 필요가 있다고 생각한다.

마지막으로, 본문에서 제시한 고주파공진형 전력변환시스템의 설계방법 및 연구의 방향은 지금까지 행한 실험과 시뮬레이션 결과로부터 얻은 정보에 근거한 것이다.

參考文獻

- [1] D. N. Divan: "The Resonant DC Link Converter - A New Concept in Static Power Conversion", IEEE PESC'86, pp. 648-656, 1986.
- [2] D. N. Divan and G. Skibinski: "Zero Switching Loss Inverters for High Power Applications", IEEE IAS'87, pp. 627-634, 1987.
- [3] P. K. Sood and T. A. Lipo:

- "Power Conversion Distribution System Using a Resonant High Frequency AC Link", IEEE PESC' 86, pp. 533-541, 1986.
- [4] P. K. Sood and T. A. Lipo: "A Versatile Power Converter for High Frequency Link Systems", IEEE Trans. PE., Vol. 3, No. 4, 1988.
- [5] Y. Nurai and T. A. Lipo: "High Frequency Series Resonant DC Link Power Conversion", IEEE PESC' 88, pp. 772-779, 1988.
- [6] 付井由宏: 「高周波共振を應用した半導體電力變換技術」, 平成 2年 電氣學會雜誌, 110卷, 1號, pp. 43-46, 1990.
- [7] S. Kondo, S. H. Yang, S. Takizawa and F. Harashima: "Resonant DC Link Dual Converter System for Motor Drives", IEEE IAS' 91, Records, pp. 789-794, 1991.
- [8] 梁承學, 淹澤聰毅, 近藤正示, 原島文雄: 「並列共振形電力變換器による誘導機の力行/回生運轉の實現と新しい回路方式の提案」, 電氣學會論文誌, 113卷 1號, 1993.
- [9] S. H. Yang and F. Harashima: "Evaluation of the Loss in the Parallel Resonant DC Link Inverter and Proposal of the Control Method", Journal of KIEE に投稿中.
- [10] 梁承學, 淹澤聰毅, 近藤正示, 原島文雄: 「直流リンク並列共振形コンバータの特性改善」, 電氣學會半導體電力變換研究會, No. SPC-91-74, 1991.
- [11] S. Freeland and R. D. Middlebrook: "A Unified Analysis of Converters with Resonant Switches", IEEE PESC' 87, pp. 20-30, 1987.
- [12] 二宮他: 「共振形コンバータの統一的解析法」, 電子通信學會論文誌, B-I, Vol. J72-B-I, No. 10, pp. 857-867, 1989.
- [13] 梁承學他: 「共振リンク電壓の抑制化を圖った並列共振形インバータの制御方式」, 電氣學會半導體電力變換研究會, No. SPC-92-70, 1992.