

새로운 ZVS 3-레벨 공진폴 인버터

백주원, 조정구*, 유동욱*, 송두익*, 원종연**

* 한국전기연구소 전력전자연구부, ** 성균관대학교 전기공학과

A Novel ZVS 3-Level Resonant Pole Inverter

Ju W. Baek*, Jung G. Cho*, Dong W. Yoo*, Doo I. Song*, Cung Y. Won**

*Power Electronics Division, KERI ** Dept. of Electrical Engineering, Sung Kyun Kwan University

Abstract - A zero voltage switching (ZVS) three level resonant pole inverter is presented for high power GTO inverters. The concept of auxiliary resonant commutated pole (ARCP) for two level inverter is extended to the three level inverter. The proposed auxiliary commutation circuit consists of one resonant inductor and two bi-directional switches, which provides ZVS condition to the main devices without increasing device voltage or current stresses. The auxiliary device operates with zero current switching (ZCS) which enables use of the low cost thyristors. The proposed circuit can handle higher voltage and higher power (1-10MVA) comparing to the two level one. Operation and analysis of the proposed circuit are illustrated. Experimental results with 10 KW, 4 kHz prototype are presented to verify the principle of operation.

I. 서론

대용량 인버터에 소프트 스위칭 기법을 적용하여 상당한 스위칭 손실 저감과 낮은 가청 소음 그리고 EMI 감소 등을 꾀할 수 있으며 동작 주파수를 증가시킬 수 있다. 그렇지만, 대용량 회로에 소프트 스위칭 기법을 적용하는 것은 소자수와 소자 전압 또는 전류 정격의 상당한 증가를 초래하므로 많은 제약이 뒤따른다. 그리고 스위칭 소자와 수동 소자의 부가적인 비용 손실로 인해 대용량에서 소프트 스위칭으로 얻은 이점이 감소된다[1-4].

이러한 상기의 문제에 비추어 볼 때, 최근 대용량 인버터에 적용할 수 있는 가장 적절한 회로 중의 하나는 공진폴 인버터(ARCPI)이다[5,6]. 각 폴에 하나의 양방향 스위치와 공진 인덕터로 구성된 보조 전류 회로는 인버터 폴과 병렬로 배치되어 있다. ARCPI는 주소자의 영전압 스위칭, 작은 전류 스트레스 그리고 보조 소자의 영전류 스위칭등과 같은 많은 장점으로 대용량 분야(0.5-1MVA)에 효과적으로 적용할 수 있다. 보조 소자로는 저가의 사이리스터가 쓰일 수 있다. 보조 회로에 의한 제어 회로의 복잡성은 대용량 인버터의 규모에 진주어 작은 부분을 차지한다.

본 논문에서는 ZVS 3-레벨 공진폴 인버터(그림 1)가 제시된다. 제시된 보조 전류 회로는 두개의 양방향 스위치와 하나의 공진인덕터로 구성되며 동작은 2-레벨 ARCPI와 유사하다. 제시한 3-레벨 공진폴 인버터는 2-레벨 ARCPI와 3-레벨 인버터의 모든 장점을 가지도록 구성하였다. 그러므로 어떠한 전압 불균형 없이 두개의 소자를 직렬로 결선할 수 있으므로 고압, 대용량화가 가능하고 출력측의 지고조파는 3-레벨 인버터의 구성으로 이어진다. IGBT를 이용한 10kW, 4kHz의 컨버터가 설계, 제작되며 실험을 통해 제시한 회로의 동작원리를 검증한다.

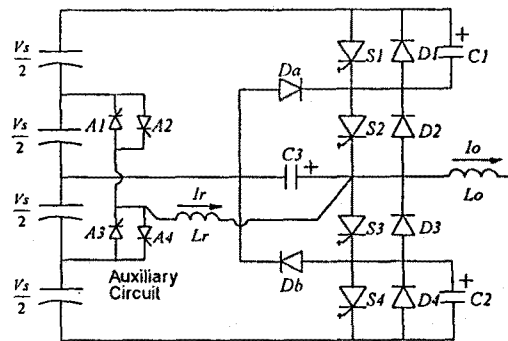


그림 1 제안된 ZVS 3-레벨 공진폴 인버터

II. 동작원리

그림 1에서 나타낸 것처럼, 보조전류회로에서 각 양방향 스위치는 분압된 입력 커패시터의 중앙에 연결되어 있다. 주소자 전압의 상승율을 제한하기 위해 세개의 커패시터가 주소자 양단과 출력단자와 중성점 사이에 접속된다. 동작원리를 간단히 회하기 위해, 모든 요소와 소자들은 이상적이고 출력전류는 일정하다고 가정한다. 그림 2와 4는 출력전류가 양의 큰 값일 때의 동작모드와 파형을 나타낸다.

모드 1 (S1, S2 ; on) : 부하전류는 S1 과 S2를 통해 흐른다.

모드 2 (S2 ; on) : S1을 턴 오프하여, 부하전류는 C1을 충전시키고 C3를 방전시킨다. 부하전류가 일정하므로 그림 4처럼 커패시터 전압은 선형적으로 증가하거나 감소한다. 만약 C1 과 C3의 합이 충분히 크다면, S1의 턴 오프손실은 거의 없다. 소자전압의 상승율은 다음과 같이 얻어진다.

$$\frac{dV_{C1}}{dt} = \frac{I_o}{C_r} \quad (1)$$

여기서, $C_r = C1 + C2 = C1 + C3$.

모드 3 (S2, Da ; on) : C3의 전압이 영에 도달할 때, Da는 턴 온하고 S3는 영전압 상태에서 턴 온한다. 출력단자는 중성점에 접속된다.

모드 4 (D3 ; on) : S2를 턴 오프하여, 부하전류를 통해 C3는 $-V_s$ 로 충전되고 C2는 D2로 방전한다. Cr이 충분히 크다면 이 턴 오프 과정은 무손실로 이뤄진다. 출력전압은 (1)과 같은 기울기로 선형적으로 감소한다.

모드 5 (D3, D4 ; on) : C2의 전압이 영에 도달할 때, D4는 턴 온하고 부하전류는 D3와 D4를 통해 흐른다. 이 모드동안에, S4는 영 전압의 조건으로 턴 온한다. 출력단자는 아래쪽 음의 스위치들에 접속된다.

모드 6 (D3, D4, A3 ; on) : D3와 D4를 턴 오프하기 위해 A3가 턴 온한다. 공진 인덕터전류는 $V_s/(2L_r)$ 의 기울기로 증가한다. 공진 인덕터전류가 선형적으로 증가하여 부하전류에 도달하면, D3와 D4는 턴 오프하게 된다.

모드 7 (S3, S4, A3 ; on) : 소자들과 스위치의 도통 손실로 인해, S2의 영전압 스위칭 턴온은 이뤄지지 않을 수 있다. 완벽한 영전압 스위칭을 위해, 공진 인덕터 전류는 그림 4에서 보여진 특정한 값 I_b 로 S3와 S4를 통해 초기화한다.

모드 8 (S3, A3 ; on) : S4를 턴 오프하므로, Lr, C2, 그리고 C3는 공진을 시작하고 C2와 C3는 그림 4에서 나타낸 것과 같이 증가한다. 커패시터 C2 전압과 인덕터 전류는 다음과 같이 표현된다.

$$I_r(t) = \frac{V_r}{2Z_r} \sin \omega_r t + I_b \cos \omega_r t + I_o \quad (2)$$

$$V_{C2}(t) = \frac{V_r}{2}(1 - \cos \omega_r t) + Z_r I_b \sin \omega_r t \quad (3)$$

여기서, $\omega_r = 1/\sqrt{L_r C_r}$, $Z_r = \sqrt{L_r/C_r}$.

모드 9 (S3, Db, A3 ; on) : C2의 전압이 V_s 에 도달하면, Db는 턴 온한다. 공진 인덕터에 남아있는 에너지는 그림 2에서 보여진 것처럼 S3와 Db를 통해 전원으로 회생한다. 이 모드 동안에 S2는 영전압으로 턴 온한다.

모드 10 (S2, Da, A3 ; on) : 인덕터 전류가 I_b 보다 작을 때, S3와 Db를 통해 흐르는 전류는 Da와 S2를 통해 흐르게 된다. 인덕터 전류는 $V_s/(2L_r)$ 의 선형적인 기울기로 감소한다. 이 모드의 끝에서 I_r 은 영에 도달하고 A3는 영전류로 자연 전류된다.

모드 11 (S2, S3, Da ; on) : 인덕터 전류가 영에 도달할 때, A3는 영전류로 자연전류된다. 부하전류는 Da와 S2를 통해 흐르고 출력은 중성점에 연결된다. 모드3과 동일한 모드이다.

모드 12 (S2, Da, A2 ; on) : Da를 오프하기 위해 A2를 턴 온하며 인덕터전류는 선형적으로 증가한다. 인덕터전류가 부하전류보다 클 때, Da는 턴 오프된다.

모드 13 (S3, Db, A2 ; on) : 모드 7에서와 같은 이유로 공진 인덕터전류는 S3와 Db를 통해 I_b 까지 초기화되어진다.

모드 14 (D2, A2 ; on) : S3를 오프하므로, Lr, C1 그리고 C3는 공진을 시작하며 출력전압은 정현파로 증가한다.

모드 15 (D1, D2, A2 ; on) : C1의 전압이 영에 도달할 때, D1이 턴 온된다. 따라서 S1의 영전압 턴 온이 이뤄진다. Lr에 남아 있는 에너지는 D1과 D2를 통해 전원으로 되돌려진다.

모드 16 (S1, S2, A2 ; on) : I_r 이 I_b 보다 작을 때, D1과 D2는 턴 오프하고, 결과적으로, S1과 S2는 턴 온한다. 그리고 인덕터 전류는 계속 감소한다. 이 모드의 끝에서 I_r 은 영에 도달하고 A2는 영전류로 자연전류된다. 이 모드 이후는 모드 1으로 다시 반복된다.

입력 전원의 중성점을 기준으로 해서 양의 스위치군에서 음의 스위치군으로 동작될 때 (모드1에서 모드5) 보조전류 회로의 동작없이 영전압 스위칭 조건이 얻어진다. 마찬가지로 I_b 가 음의 값이고 음의 스위치군에서 양의 스위치군으로 스위칭이 이뤄질 때도 같다. 스위칭 주기(모드2와 모드4)는 부하전류의 크기에 의존한다. 만약 부하전류가 작으면 이 구간은 상당히 넓어진다. 이 문제는 보조회로에 의해 해결할 수 있다. 그림 3과 5는 양의 정부하에서의 동작모드와 파형을 나타낸다. 모드 2(모드 4)는 다음과 같이 세가지의 모드로 나눌 수 있다.

모드 2a (S1, S2, A1 ; on) : 인덕터 전류는 전류치 I_b 까지 A1을 턴 온하여 증가시킨다.

모드 2b (S2, A1 ; on) : S1을 턴 오프하여, Lr과 C1 그리고 C3는 그림 3에서 나타낸 것처럼 공진한다. 빠른 공진과정과 완전한 영전압이 얻어진다.

모드 2c (S2, Da, A1 ; on) : C1의 전압이 V_s 에 도달되면 Da는 턴 온되고 공진 인덕터에 남은 에너지는 Da와 S2를 통해 전원측 커패시터로 회생된다.

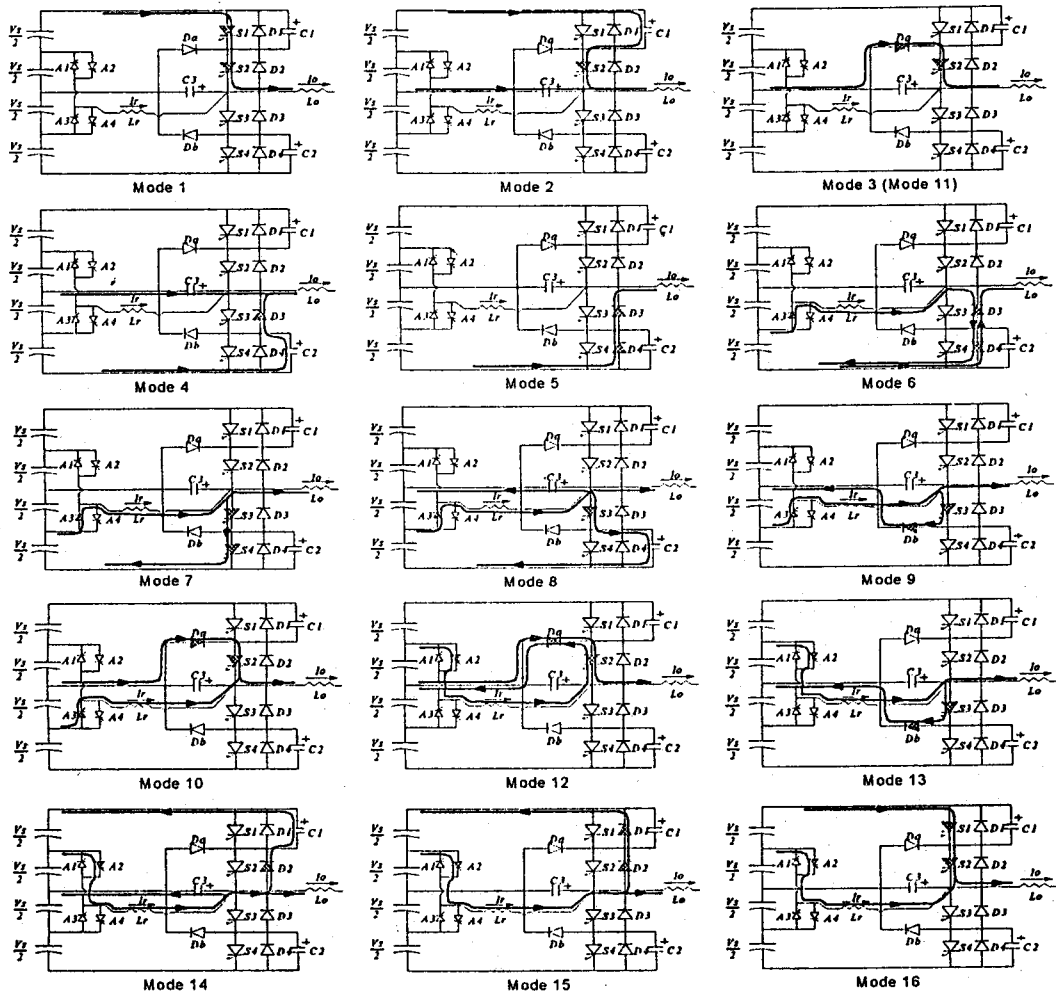


그림 2 동작 모드

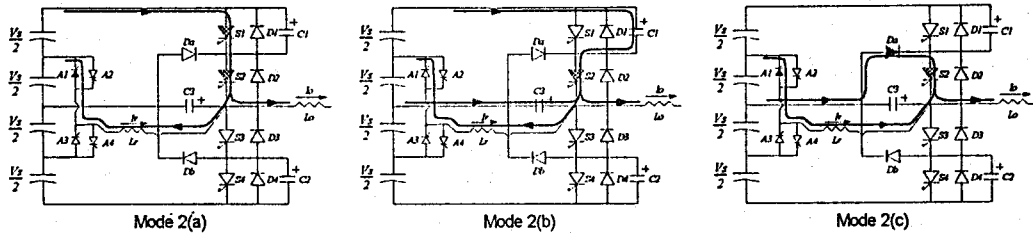


그림 3 출력이전류 I_o 가 작을시 세분한 동작모드

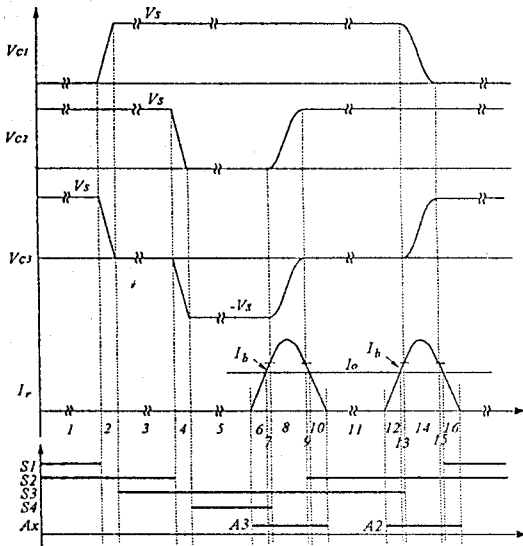


그림 4 동작파형

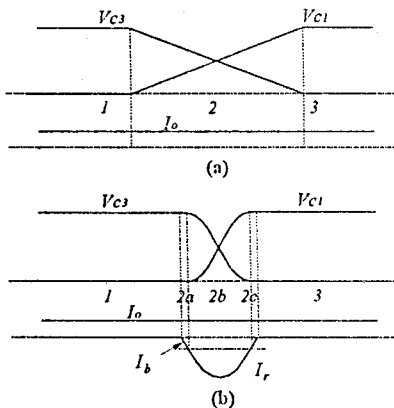


그림 5 낮은 출력전류에서의 주 스위치 오프시 동작파형
(a) 보조 전류회로 없을 시, (b) 보조 전류회로 동작시

III. 실험 결과

제시된 3-레벨 공진플 인버터의 동작을 검증하기 위해 4 kHz, 10 kW 의 컨버터를 제작하였다. 실험에 사용된 소자 값들은 그림 6에서 보여진다. 시험의 용이성을 위해 GTO대신 구동이 쉬운 IGBT를 주 소자로 사용하였으며 후지사의 2MBI200L-060 (600V/200A)을 채택하였다. 그리고 보조 소자는, 모토로라사의 fast recovery thyristor S2800M (600V/10A) 을 사용하였다. 입력 커패시터의 전압균형을 위해 4개의 저항이 입력커패시터에

병렬로 연결되었다. 3상의 ARCFI에서는 이러한 입력커패시터의 전압 불균형 문제가 전혀없다. 부하로는 100uH의 인덕터가 입력전원의 중성점에 접속되었다. 출력전압은 모든 가능한 동작모드를 나타내기 위해 적절히 제어하였다. 그림 7은 진부하에서의 전류 그리고 공진 인덕터 전류를 나타낸다. 보조회로는 메인 다이오드의 전류시에 동작한다. 그림 8(a)는 그림 7의 회로 파형을 나타낸다. 보조 싸이리스터 A3는 D4를 전류시키고 S2를 영진압 턴온시키기 위해 턴온된다. 싸이리스터는 역회복 전류가 존재하므로 이로 인한 손실이 상당하고 대용량 응용 분야에서는 부가적인 스너비 회로가 필요하게 된다. 이 문제는 그림 8(b)에서 나타난 것 처럼 싸이리스터에 직렬로 빠른 역회복 특성을 갖는 다이오드를 연결하여 해결할 수 있다. 그림 9는 큰전류가 흐르는 스위치의 전류파형을 보여준다. 영진압 스위칭이 보조회로의 동작없이 이뤄진다. 그림 10은 낮은 전류에서의 파형을 나타낸다. 그림에서 보여진 것 처럼 보조회로의 동작에 의해 빠른 동작이 이뤄진다. 모든 파형들이 이론적인 것과 잘 일치함을 알 수 있다.

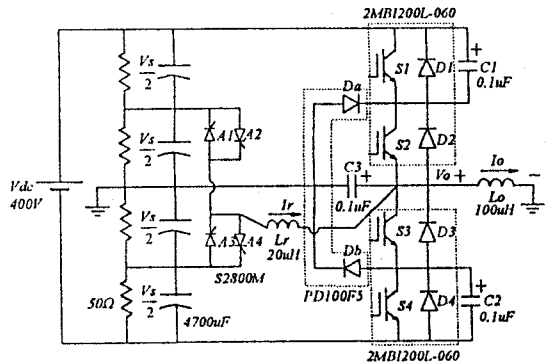


그림 6 실험에 쓰인 회로

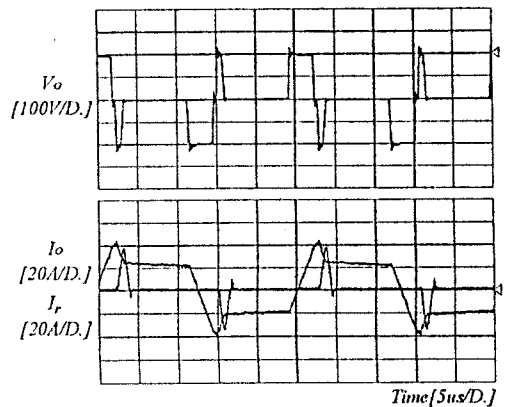
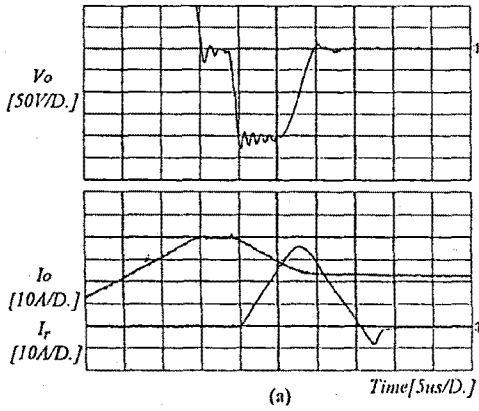
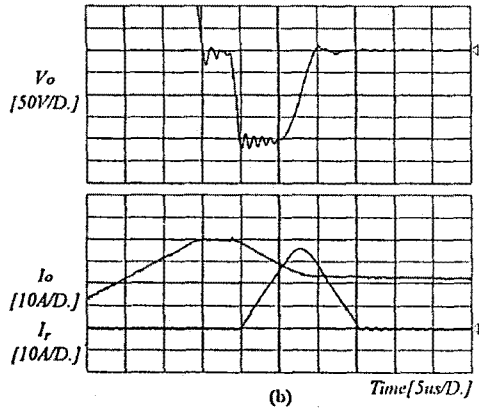


그림 7 출력전압과 출력전류 그리고 공진 전류파형



(a)



(b)

그림 8 다이오드 오프타임의 확대파형, 보조스위치가

(a) 싸이리스티언 경우, (b) 싸이리스티와 직렬로 다이오드가 연결된 경우

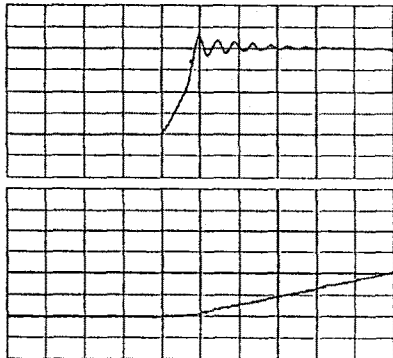


그림 9 큰전류에서 스위치 오프타임의 확대파형

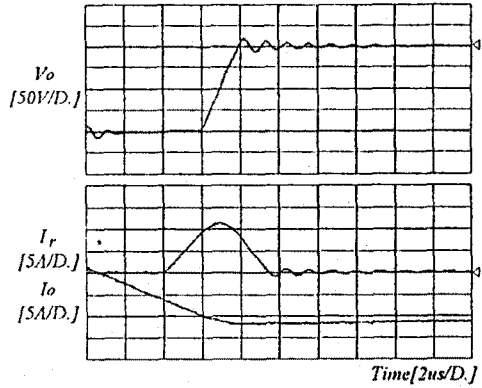


그림 10 낮은 전류에서 스위치 오프타임의 확대파형

IV. 결론

새로운 ZVS 3-레벨 공진풀 인버터가 제시되었다. 동작 원리와 해석을 하였으며, IGBT를 이용한 10 KW, 4 KHz 컨버터가 제작되어 동작원리가 검증되었다. 제시된 회로는 주소자의 영전압 스위칭과 보조소자의 영전류스위칭 그리고 낮은 소자전압과 전류 스트레스등의 많은 장점을 갖는다.

더우기, ZVS 3-레벨 공진풀인버터는 기존의 스너비회로를 이용한 3-레벨 인버터에 비해서는 보다 간단하고 더 높은 효율을 가지며 저가로 구성할 수 있다. 제시된 3-레벨 공진풀 인버터는 대용량 GTO 인버터 응용분야 (1-10 MVA)에 매우 효과적이라고 사료된다.

참고문헌

- [1] D. M. Divan, G. Skibinski, "Zero switching loss inverters for high power applications", IEEE IAS Conference Proceedings 1987, pp.627-634.
- [2] A. Cheriti, K. Al-Haddad, et. al., "A rugged soft commutated PWM inverter for AC drives", IEEE PESC 1990 REC., pp. 646-662
- [3] J. G. Cho, D. Y. Hu and G. H. Cho, "Three phase sinewave voltage source inverter using the soft switched resonant poles", IEEE IECON 1989 REC., pp. 48-53.
- [4] W. Yi, H. L. Liu, Y. C. Jung, J. G. Cho and G. H. Cho, "Program-controlled soft switching PRDCL converter with a new space vector PWM algorithm", IEEE PESC, 1992, pp. 313-319.
- [5] W. McMurray, "Resonant snubbers with auxiliary switches", IEEE IAS Conference Proceedings 1989, pp. 829-834.
- [6] R. W. DeDoncker and J. P. Lyons, "The auxiliary resonant commutated pole converter", IEEE IAS Conference Proceedings 1990, pp. 1228-1235.