

스너버에너지회생형 전류형 전력변환기의 설계법

김태진 o·伊瀬敏史·박성준***·변영복***·김철우*

부산대학교·大阪大學·거제전문대·전기연구소***

Design of Current Source AC/DC Converter with Snubber Energy Recovery

Tae-Jin Kim o·Toshifumi Ise**·Sung-Jun Park***·Young-Bok Byun****·Cheul-U Kim*
Pusan Nat. Univ.·Osaka Nat. Univ.·Keo-Jae Collage***·KERI****

Abstract : Current source AC/DC converter with snubber energy recovery for high efficiency and high power converter was proposed. In this paper, design of the converter is presented. Voltage charged snubber condenser on commutation process is analyzed by theoretical analysis, simulation and experimental result.

1. 서 론

고효율, 대용량화가 용이한 스너버에너지회생형 전류형전력변환기, 초전도전력저장시스템 및 직류송전등 대용량전력변환을 필요로 하는 분야에 적용이 기대되고 있다. 이에, 스너버에너지회생형 전류형전력변환기는 변압기를 이용한 병렬접속으로, 고조파를 저감시키는 병렬다중화방식이 제안되어 있다.¹⁾ 그러나, 전력변환기의 대용량화시 스위칭소자의 내압 등을 결정하는 스너버콘덴서의 설계기준이 요구되지만, 아직 그 용량설계에 있어서는 밝혀져있지 않다. 본 연구에서는 전류시의 등가회로로부터 해석적으로 스너버콘덴서의 충전전압을 산출하고, 시뮬레이션에 의한 전류과정을 상세히 고찰하여, 이를 비교검토한다. 실험을 통해 시뮬레이션과 일치함을 확인하고 이 결과들로부터 스너버콘덴서의 설계법을 제안한다.

2. 전류시의 등가회로

그림 1은 여기에서 검토하고 있는 스너버에너지회생형 전류형전력변환기의 주회로이다. 이 회로에서는 교류측의 인덕턴스에 의한 스위칭소자의 턴온시의 전류변화율(di/dt)이 억제된다. 턴오프시 C1,C2등이 스너버콘덴서로 작용해서 스위칭소자의 전압변화율(dv/dt)을 억제시킨다. 또, 스너버회로가 저항을 갖지 않음으로써 스너버에너지가 전부 주회로에 회생된다.

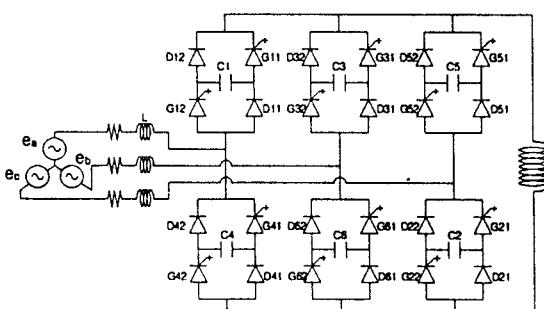


그림 1 주회로 구성

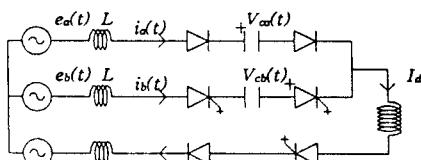


그림 2 전류시의 등가회로

그림 1의 회로에서 전류시의 등가회로를 해석하고 스너버콘덴서의 충전전압을 산출한다. 그림 2는 그림 1의 a상으로부터 b상으로의 전류시 등가회로이다. b상의 스너버콘덴서C3에 충전되어 있는 전압을 V_{msb} 라 하고, 전류개시시각 $t = t_0$ 에서 a상의 스너버콘덴서C1이 충전, b상의 스너버콘덴서C3이 각각 방전하기 시작한다. 즉, $V_{ad}(t_0) = 0$, $V_{bd}(t_0) = V_{msb}$ 이다. 그림 2에서 다음의 방정식을 얻을 수 있다.

$$e_a(t) - L \frac{di_a(t)}{dt} - v_{ca}(t) = e_b(t) - L \frac{di_b(t)}{dt} - v_{cb}(t) \quad \text{---(1)}$$

$$v_{ca}(t) = \frac{1}{C} \int i_a(t) dt \quad \text{---(2)}$$

$$v_{cb}(t) = V_{msb} - \frac{1}{C} \int i_b(t) dt \quad \text{---(3)}$$

$$i_a(t) + i_b(t) = I_d \quad \text{---(4)}$$

식 ①~④에서 $i_b(t)$ 는 다음 식과 같이 된다.

$$i_{bt} = K \left\{ \cos(\omega t + \alpha) - \cos \alpha \cos(\omega LC t) + \frac{\omega LC}{\omega} \sin \alpha \sin(\omega LC t) \right\}$$

$$+ \frac{V_{msb}}{2} \omega LC \sin(\omega LC t) + \frac{I_d}{2} (1 - \cos(\omega LC t)) \quad \text{---(5)}$$

$$\text{단, } K = \frac{\sqrt{3} \omega V_m}{2(1 - \omega^2 LC)}, \quad \omega LC = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

V_m 은 교류선간전압최대치, ω 는 전원각주파수, α 는 점호각

식 ⑤를 식 ③에 대입하면 $V_{ad}(t)$ 는 다음과 같이 된다.

$$V_{ad}(t) = K \left\{ \frac{1}{\omega} \sin \alpha \cos(\omega LC t) + \frac{1}{\omega LC} \cos \alpha \sin(\omega LC t) \right\}$$

$$- \frac{1}{\omega} \sin(\omega t + \alpha) + \frac{V_{msb}}{2} + \frac{V_{msb}}{2} \cos(\omega LC t)$$

$$- \frac{I_d}{2C} \left(t - \frac{1}{\omega LC} \sin(\omega LC t) \right) \quad \text{---(6)}$$

전류가 끝나는 시각 $t = t_e$ 에서 1) $i_b(t_e) = I_d$, 2) $V_{ad}(t_e) = 0$ 이 성립한다고 가정해서 식 ⑤, ⑥에서 충전전압 V_{msb} 를 얻을 수 있다.

3. 회로 시뮬레이션에 의한 회로동작의 검토

그림 1의 회로를 시뮬레이션을 통해 전류시의 전류동작과 스너버콘덴서의 충전전압에 대해 검토한다. 표 1은 시뮬레이션의 회로정수이다. 그림 3의 a, b)는 각각의 점호각 $\alpha=0^\circ, 120^\circ$ 의 경우 스너버콘덴서의 충전전압의 시뮬레이션의 결과이다. 전류과정후, 스너버콘덴서의 추가충전이 없는 점호각 $\alpha=0^\circ$ 와 다른 암의 스위칭동차에 영향을 받아 추가충전과정이 존재하는 $\alpha=120^\circ$ 의 전류과정에 관하여 고찰한다. 그림 4는, $\alpha=0^\circ, 120^\circ$ 의 경우 전류과정의 스너버콘덴서의 충전전압과 3상전류에 대한 상세한 파형이다.

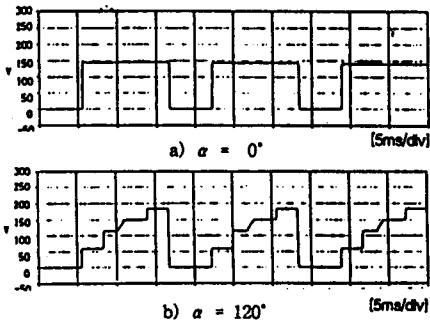


그림 3 위상제어시의 스너비콘엔서의 충전전압

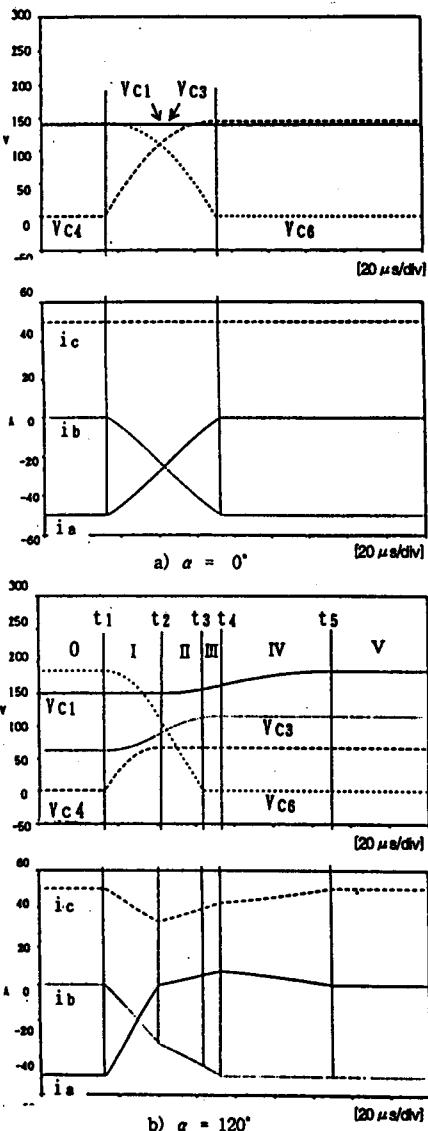


그림 4 전류시의 각 스너비콘엔서의 충전전압 및 3상 전류파형

<3.1> 점호각 $\alpha=0^\circ$ 의 경우

G41과 G42를 터오프하고, 동시에 G61과 G62를 터온하면, D41-C4-D42의 경로로 스너비콘엔서가 충전되고 D61-C6-D62의 경로로 방전된다. 전류완료시의 스너비콘엔서 C4의 전압 V_{C4} 는 전류

전의 스너비콘엔서 C6의 전압 V_{C6} 과 같고, 전류과정동안 C1, C3의 전압은 변화가 없다. 또, 전류가 끝난 후 G41과 G42를 다시 터온할 때까지 스너비콘엔서 C4에는 추가충전이 일어나지 않는다.

<3.2> 점호각 $\alpha=120^\circ$ 의 경우

전류과정을 6개의 모드로 나누어서, 그림 4의 상세한파형을 참고하면서 회로동작을 검토한다. 그림 5는 각 모드의 전류과정이다.

●모드 0 ($t_1 \sim t_2$) :

c상에서 a상으로 전류가 흐르고 있다. C1, C2, C3, C6이 충전되어 있고, C4, C5의 전하는 0이다.

●모드 I ($t_2 \sim t_3$) :

$t=t_2$ 일 때 G41과 G42를 터오프하고, G61과 G62를 터온한다. D41-C4-D42의 경로로 스너비콘엔서가 충전되고 D61-C6-D62로 방전되기 시작한다. D31, D32에 걸리는 전압은 다음과 같다.

$$V_{D31}(t) = V_{D32}(t) = V_{C4}(t) + V_{ac}(t) + V_{ac}(t) - V_{C6}(t) \quad \text{---⑦}$$

단, $t_1 \leq t < t_2$ 에서 V_{C6}, V_{C4}, V_{C3} 은 각각의 스너비콘엔서전압

$$V_{ac} = e_a - e_c \quad \text{---(8)}$$

식 ⑦에 의해 D31과 D32가 도통하는 조건은 다음과 같다.

$$V_{C4}(t) + V_{C6}(t) + V_{ac}(t) > V_{C3}(t) \quad \text{---⑧}$$

스너비콘엔서의 충전전압이 식⑧을 만족하면, C6의 방전전류가 D31-C3-D32로 흘러 C3은 추가충전이 일어나기 시작한다. C6의 방전전류는 C3축과 동시에, 교류축으로도 흘러 $i_c(t)$ 은 감소하고 C3의 충전전류는 증가한다. C4의 충전이 끝나면 모드 I 이 끝난다.

●모드 II ($t_3 \sim t_4$) :

C4의 충전이 끝난 후에도 C6의 방전은 계속된다. D11과 D12에 걸리는 전압은 다음과 식과 같다.

$$V_{D11}(t) = V_{D12}(t) = V_{ac}(t) + V_{C4}(t) - V_{C6}(t) \quad (\text{단}, t_2 \leq t < t_3) \quad \text{---⑨}$$

식 ⑨에 의해 D11과 D12가 도통하는 조건은 다음과 같다.

$$V_{ac}(t) + V_{C4}(t) > V_{C6}(t) \quad \text{---⑩}$$

스너비콘엔서의 충전전압이 식⑩을 만족하면, C1에는 D11-C1-D12의 경로로 추가충전이 일어난다. C3의 방전전류는 감소하기 시작하고, $i_c(t)$ 은 증가한다. C6의 방전이 끝나면 모드 II 이 끝난다.

●모드 III ($t_4 \sim t_5$) :

C6의 충전이 끝나고, D61-G61과 D62-G62로 전류가 흐른다

●모드 IV ($t_5 \sim t_6$) :

C3의 충전이 끝나고, b상의 전류는 전부 교류축으로 전류가 흐른다. C1의 충전전류가 감소하기 시작한다.

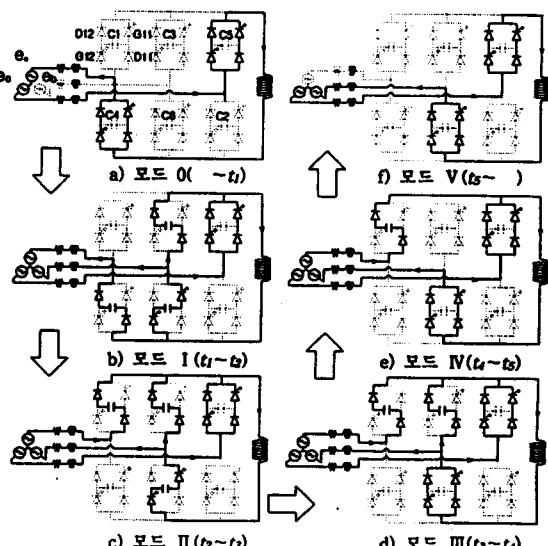


그림 5 각 모드별 전류동작($\alpha=120^\circ$)

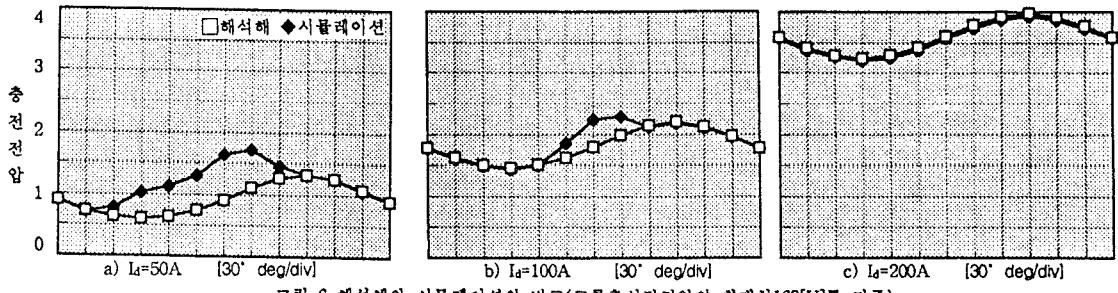


그림 6 해석해와 시뮬레이션의 비교(교류축선간전압의 최대치163[V]를 기준)

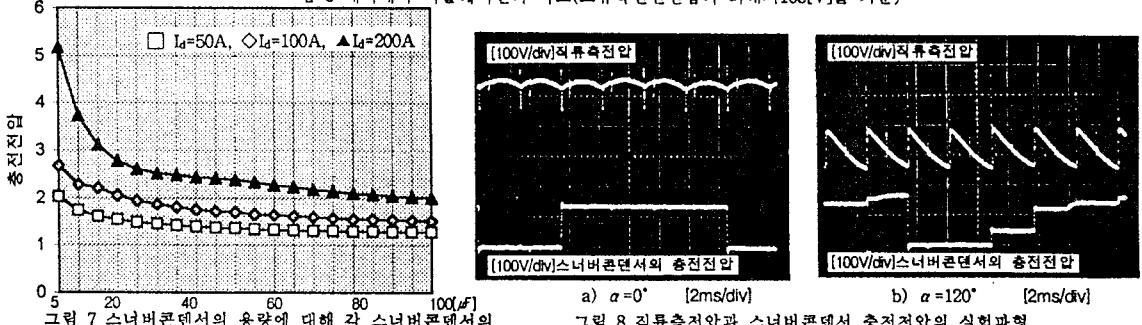


그림 7 스너버콘덴서의 용량에 대해 각 스너버콘덴서의 최대충전전압(교류축선간전압의 최대치163[V]를 기준)

●모드V($\alpha \sim 0^\circ$) :

C1의 충전전류가 0이 되고, C1의 추가충전도 끝난다. C3상의 전류는 직류축전류와 같아진다. 직류전류는 c상에서 b상으로 흐른다.

이상과 같이 스너버콘덴서 C1과 C3에는 추가충전이 일어난다. 즉, 그림 5에서는 이상의 고찰로부터 식⑧과 ⑩이 성립하는 경우의 전류과정이다. 전원전압의 위상관계로부터, $\alpha=60^\circ \sim 240^\circ$ 의 사이에서 V_{ac} 는 정이므로 식⑧이 성립하기 쉬우며, $\alpha=0^\circ \sim 180^\circ$ 의 사이에서 V_{ab} 는 정이므로 식⑩이 성립하기 쉽다. 그러나 스너버콘덴서의 충전전압이 직류축전류에 의존하기 때문에 전류동작을 적용할 수 있는 점호각 α 의 범위를 한정하는 것은 곤란하다.

4. 스너버콘덴서 전압과 용량의 설계

<4.1> 회로시뮬레이션의 결과와 등가회로의 해석해의 비교

스너버콘덴서의 충전전압은 그 스너버콘덴서와 H형으로 구성하고 있는 스위칭소자의 터오프동작뿐 아니라, 같은 상에 접속되어 있는 스위칭소자의 터온, 터오프동작의 영향에 판여하고 있음을 알 수 있었다. 또, 전류과정이 외에 있어서도, 그림 3의 b)에서 스너버콘덴서의 전압이 천천히 상승하는 구간이 존재한다. 이 구간은 전원전압에 의해 스너버콘덴서에 추가충전이 일어나고 있다. 전류과정 후에 충전전압이 충분히 높으면, 이 추가충전은 일어나지 않는다.

또, 추가충전이 일어나는 경우는 등가회로의 해석해에서 식⑤ 및 ⑥을 풀 때 가정한 사실에 위배되므로 시뮬레이션과 해석해가 일치하지 않음을 알 수 있다.

그림 6은 회로 시뮬레이션의 결과와 등가회로의 해석해를 비교해서 나타내고 있다. 그림 6의 a), b), c)은 직류축전류 50A, 100A, 200A에 있어서 각 점호각에 대한 스너버콘덴서의 충전전압의 최대치를, 선간전압의 피크치 163[V]를 기준으로 표시한다. 직류축전류를 증가시킴에 따라 터오프시 스너버콘덴서에 충전되는 전압은 증가하므로 시뮬레이션과 해석해가 일치하는 점호각의 범위가 점점 넓어지고 있음을 알 수 있다. 이상의 결과에서 추가충전이 있는 경우(그림 6의 a) 및 b)의 경우) 점호각 $\alpha=210^\circ$ 에서 스너버콘덴서의 충전전압이 최대가 된다. 그 이유는 다음과 같다.

그림 4의 b)의 모드 I ~ III의 구간에 있어서, V_{ab} 와 교류축선간전압의 차에 의해 C3에 추가충전되는 시간을 결정한다. $\alpha=210^\circ$ 의 경우, V_{ab} 가 최대치가 되므로 C3의 추가충전시간이 길어져 추가충전되는 전압은 최대이 된다.

<4.2> 실험결과

그림 1의 회로의 실험한 결과를 그림 8에 나타낸다. 그림 3과 같이, 각 위상각의 충전전압이 시뮬레이션과 일치함을 알 수 있다.

<4.3> 스너버콘덴서의 설계

이상에서 스너버콘덴서의 추가충전이 있는 경우, 위상제어방식의 점호각 $\alpha=210^\circ$ 에서 스너버콘덴서의 충전전압이 최대치를 가짐을 알 수 있다. 직류축전류가 충분히 커서 추가충전이 없는 경우는 그림 7의 c)에 나타낸 바와 같이 $\alpha=270^\circ$ 스너버콘덴서가 최대충전전압을 가진다. 그러나 이런 경우 스너버콘덴서의 충전전압이 전원전압보다 최대 4배나 되어서 사용할 스너버콘덴서의 내압을 고려해 볼 때 실용적이지 못하다.

그림 7은 위상제어 방식의 점호각 $\alpha=210^\circ$ 에 있어서, 스너버콘덴서를 $5\mu F \sim 100\mu F$ 의 사이를 $5\mu F$ 씩 증가시켜 가면서 직류축전류가 각 50A, 100A, 200A에 대한 스너버콘덴서의 충전전압의 최대치를 나타내었다. 이 그래프로부터 스너버콘덴서의 충전전압의 적정치(예를 들면 직류축전류50A시 전원전압피크치의 1.5배)이하가 되도록 정전용량을 선정하면 좋다.

6. 결론

스너비에너지회생형 전류형전력변환기에 있어서 전류시의 등가회로의 해석에 의해 스너버콘덴서의 충전되는 전압을 산출하였다. 또, 회로 시뮬레이션을 통해서, 전류과정이 끝난 후에도 같은 상에 접속되어 있는 스위칭소자의 터온, 터오프에 의해 스너버콘덴서의 추가충전이 일어나고, 그 값은 $\alpha=210^\circ$ 에서 최대치를 가짐을 시뮬레이션과 실험을 통해 알수 있었다. 이 결과들로부터 스너버콘덴서의 설계방법으로써, $\alpha=210^\circ$ 에 시뮬레이션을 통하여 스너버콘덴서의 정전용량과 스위칭소자의 내압을 설계하면 좋음을 알 수 있다.

표 1 회로정수

교류축선간전압(실효치), 주파수	115V, 60Hz
스너버콘덴서	$10\mu F$
교류축 인덕턴스	$115\mu H$
변압기등가직렬저항	0.09Ω
직류축인덕턴스	$25mH$

참고문헌

- [1] 伊類の2名、「スナバエネルギー回生形電流形電力交換器の特性とその並列多量化」電氣學會論文集D, Vol.115, No.5, pp.530-538(1995)