

STATCOM에서 영상분 전류주입에 의한 셀간 전압평형화 제어의 향상

권병기¹, 정승기², 김태형[†]

Enhancement of Cell Voltage Balancing Control by Zero Sequence Current Injection in a Cascaded H-Bridge STATCOM

Byung-Ki Kwon¹, Seung-Ki Jung², and Tae-Hyeong Kim[†]

Abstract

The static synchronous compensator (STATCOM) of cascaded H-bridge configuration accompanying multiple separate DC sides is inherently subject to the problem of uneven DC voltages. These DC voltages in one leg can be controlled by adjusting the AC-side output voltage of each cell inverter, which is proportional to the active power. However, when the phase current is extremely small, large AC-side voltage is required to generate the active power to balance the cell voltages. In this study, an alternative zero-sequence current injection method is proposed, which facilitates effective cell balancing controllers at no load, and has no effect on the power grid because the injected zero sequence current only flows within the STATCOM delta circuit. The performance of the proposed method is verified through simulation and experiments.

Key words: STATCOM, DC Voltage unbalance, Cell voltage balancing, Reactive power component current, Zero sequence current

1. 서 론

정지형 무효전력 보상장치(이하 STATCOM이라 칭함)는 대용량 부하의 무효전력을 보상함으로써 선로의 전압을 안정화시키고 계통손실을 억제하는 데에 주목적이 있지만 불평형 부하전류를 보상하는 데에도 효과적으로 적용할 수 있다. 아크를 발생시켜 고철을 녹이는 전기로가 불평형이 심한 부하의 대표적인 예로서, 전극봉과 고철 사이에 발생하는 아크의 길이와 형태가 일정하지 않기 때문에 전류가 매우 불규칙하고 급격하게 변동할 뿐 아니라 각 상의 전극봉 사이에 흐르는 부하전류에 큰 불균형이 나타나게 된다. STATCOM은 부하의

급격한 변동에 대해 빠른 응답특성을 가지며 역상분전류 보상을 통해 부하 불평형에도 대응이 가능하기 때문에 근래 이러한 종류의 부하에 적용이 확대되고 있다.

여러 종류의 STATCOM 토폴로지 중 특히 대용량 용도에서는 다단 H-브릿지 구조의 STATCOM이 고압화와 모듈화가 용이하다는 장점으로 인해 주된 관심의 대상이 되고 있다.^{[1]-[3]} 이 형태는 그림 1에 보인 것과 같이 H-브릿지 구조의 단상 인버터를 기본 구성단위(셀)로 하고 이들을 직렬로 연결하여 한 개의 상을 구성하며, 세 개의 상을 묶어 전체가 하나의 3상 인버터로 작동하게 한 것을 말한다. 일반적으로 STATCOM 용도에 사용되는 인버터는 직류단에 별도의 직류전원을 접속하지 않고 커패시터만으로 직류전압이 지지되는 구조를 취하기 때문에 운전상태에 따라 교류측에서 유입되는 전력의 변화로 직류단전압이 변동할 수 있다. 따라서 직류단전압은 기본적으로 인버터가 제어성을 유지하는 데에 필요한 최소전압과 과전압 한계를 넘지 않는 최대전압의 범위 내에 머무르도록 제어되어야 한다. 나아가 여러 개의 셀로 이루어진 다단 H-브릿지 STATCOM에서는 그림 1에서와 같이 각 셀들이 변압기를 거치지 않고 직결된 경우 셀들의 직류단이 분리되어야 하기 때문에

Paper number: TKPE-2015-20-4-4

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: th2kim@poscoict.com, POSCO ICT R&D Center

Tel: +82-2-3290-4479 Fax: +82-2-925-1812

¹ POSCO ICT R&D Center

² Dept. of Electrical Eng., Kwangwoon University

Manuscript received Feb. 16, 2015; revised Mar. 18, 2015; accepted June 11, 2015

- 본 논문은 2014년 추계학술대회 우수추천논문임

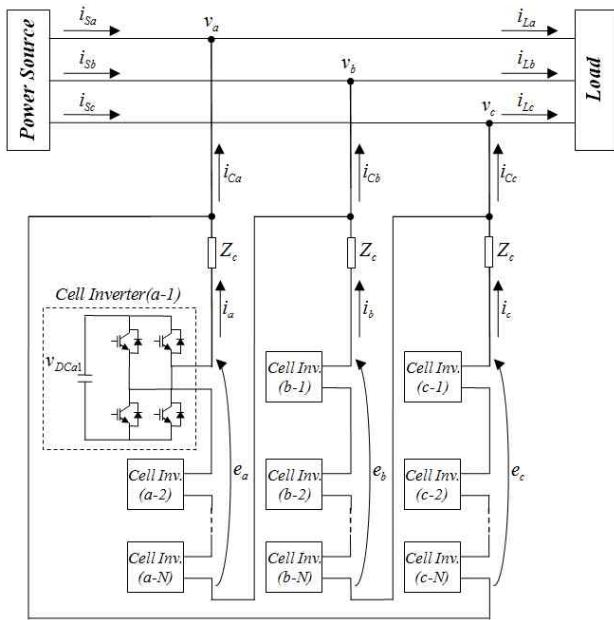


Fig. 1. Delta-connected cascaded H-bridge STATCOM.

모든 셀의 직류단전압이 균등한 크기를 갖도록 하는 평형제어가 이루어져야 한다.

다단 H-브릿지 STATCOM에서 직류단전압들 사이의 불평형은 두 가지 유형, 즉 상과 상 사이의 불평형과 각 상에서 직렬 셀들 사이에 나타나는 불평형으로 구분된다. 상간 불평형은 STATCOM이 부하의 무효전력을 보상하고 있을 때 3상의 합산 유효전력이 영이라 해도 각 상에 영이 아닌 일정한 크기를 갖는 유효전력이 존재함으로 해서 셀들의 직류단전압이 어느 상에서는 전체적으로 지속 상승하고 다른 상에서는 지속 하강하는 식으로 차이가 벌어지게 되는 것을 말한다. 그 원인은 각 상의 비대칭적인 내부손실일 수도 있으나, 주로 부하의 불평형 전류에 대응하는 불평형 보상전류가 흐를 때 상별 유효전력에 차이가 생기는 데에서 비롯된다. 즉 보상전류에 포함된 역상 성분이 상간 직류단전압 불평형의 원인이 된다. 이에 반해 각 상 직렬셀간 불평형은 부하의 불평형 여부에 상관없이 셀들 사이의 동작상 오차, 스위칭소자의 전압강하 차이로 인한 손실의 불균형, 셀별 직류단 커패시터 용량의 차이 등에 의해 일어나게 된다.

상간 불평형과 셀간 불평형은 이처럼 원인이 다르기 때문에 불평형의 억제를 위한 제어도 서로 다른 방식으로 이루어져야 한다. 상간 직류단전압 불평형 억제에 있어서는 STATCOM의 출력전류에 정상분 유효전류를 중첩시키거나 역상분전류를 중첩시킴으로써 상별 유효전력의 불균형을 보상하는 방식이 제안된 바 있다. 그러나 이들은 계통전류에 영향을 미치게 되어 STATCOM의 보상성능을 저하시키는 문제를 일으킨다.^{[4]-[5]} 이에 대한 해결책으로 근래에는 계통 쪽으로 유입되는 보상전류에 영향을 미치지 않으면서 각 상의 불평형 전압을 제어할

수 있는 영상분전압이나 전류를 주입하는 방식들이 제시되고 있다.^{[6]-[7]} 한편 셀간 불평형의 억제는 각 셀의 교류측 전압과 전류, 그리고 이들 사이의 위상차에 의해 결정되는 셀별 유효전력을 제어함으로써 이루어지게 되는데, 직렬 셀들에 흐르는 전류는 모두 같기 때문에 개별 셀 인버터가 직접 제어할 수 있는 요소로는 출력전압의 크기와 위상이 있으며, 이를 조합하면 전압의 크기만 제어하는 방식^[8], 전압의 위상만 제어하는 방식^[9], 그리고 전압의 크기와 위상을 같이 제어하는 방식^[10]으로 나눌 수 있다. 이중 출력전압의 크기만 가변하는 방식은 제어범위가 좁다는 단점이 있고, 위상만 가변하는 방식은 다른 제어기들과 간섭이 발생한다는 단점이 있기 때문에 주로 전압의 크기와 위상을 함께 제어하는 방식이 더 유리하다. 하지만 이 방식도 상전류가 너무 작은 영역에서는 셀간 전압불평형 보상기가 제어할 수 있는 유효전력이 작게 되어 안정적인 전압불평형제어가 어려워지므로 이에 대한 추가적인 제어가 요구된다.

이상의 불평형 억제를 위한 제어의 필요성 때문에 다단 H-브릿지 STATCOM의 직류단 전압제어는 3개 층위로 구성된다. 맨 상층에서는 전력회로 전체의 내부 손실을 공급함으로써 직류단 커패시터들에 저장되는 정전 에너지의 총량을 일정하게 유지시키기 위해 STATCOM 보상전류(i_{Ca} , i_{Cb} , i_{Cc})에 포함되어야 할 유효성분 전류의 크기를 결정한다. 두 번째 층위에서는 (그림 1에 보인 Δ 결선의 경우) 위에서 결정된 보상전류에 대응하는 상전류(i_a , i_b , i_c)를 결정하며, 여기서 각 상별 평균 직류단전압 사이의 편차를 억제하기 위해 영상전류성분을 중첩시킨다.^[11] 맨 아래 층위에서는 이렇게 결정된 상전류의 조건 하에서 각 셀의 교류단 전압의 크기와 위상을 조절함으로써 셀별 직류단 전압의 편차를 억제하기 위한 제어가 이루어진다.

본 논문에서는 이중 세 번째 층위의 셀간 불평형 억제방안을 다루고 있다. 먼저 셀 출력전압으로 주 제어기에서 전달된 기준전압과 이 전압에 직교하는 평형화 보상전압을 중첩함으로써 셀간 직류단전압 평형화가 이루어지는 원리를 살펴본다. 또한, 상전류가 매우 작은 영역에서도 이 평형화 제어를 안정적으로 동작시키기 위한 방안에 대해 설명하는데, 우선 무효전력성분의 전류를 중첩함으로써 각 상전류의 크기를 일정한 크기 이상으로 유지하는 방안을 생각해 볼 수 있다. 이 경우, 셀간 직류단전압의 평형화는 안정적으로 유지되지만 임의로 주입하는 무효전력으로 인해 계통전류에 영향을 미치게 되어 STATCOM의 보상성능저하를 일으키게 된다. 또 다른 방법으로 보상성능에 영향을 미치지 않도록 영상분 전류를 중첩시키는 방식을 고려해 볼 수 있다. 이 경우, 각 상의 전압과 전류 사이의 직교 관계가 어긋남에 따라 상별 유효전력이 인가된다. 이로 인해, 각 상의 직류단 커패시터 전압이 비대칭적으로 상승하거나

하락하는 상간 불평형이 일어나고 이러한 불평형은 두 번째 층위의 상간 평형화제어와 서로 간섭을 일으킴에 따라 궁극적으로는 영상분전류 중첩의 효과가 상쇄된다. 본 논문에선 이에 대한 해결책으로 교번하는 영상분 전류를 중첩함으로써 계통전류에 영향을 미치지 않으면서 시스템의 안정도를 저해하지 않는 방안을 제시하고 그 성능에 대해 실제 구현된 시스템의 시험결과를 통해 입증한다.

2. 셀간 평형화 제어기의 설계

그림 1과 같은 Δ 결선의 다단 H-브릿지 STATCOM에서 한 상에 직렬로 연결한 셀 인버터의 개수를 N이라 할 때 해당 상에서 출력하고자 하는 기준전압과 k-번째 셀 인버터의 기준전압은 아래와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 x는 a상 또는 b상, c상을 뜻하고, k는 1에서 N 사이의 값을 나타낸다.

$$e_{x(ref)} = \sqrt{2} E_{x(ref)} \sin(\omega_c t) \quad (1)$$

$$e_{xk(ref)} = \frac{\sqrt{2} E_{x(ref)}}{N} \sin(\omega_c t), \left\{ \tilde{V}_{xk(ref)} = \frac{\tilde{V}_x(ref)}{N} \right\} \quad (2)$$

그림 2는 STATCOM 내 임의의 한 상의 등가회로를 나타낸다. 이때 상내 전체 직류단전압의 합이 일정하게 유지되기 위해선 해당 상에 유입(유출)되는 유효전력(P_x)이 항상 영이 되어야 하며, 이를 위해 상전압(\tilde{E}_x)과 상전류(\tilde{I}_x)는 서로 직교해야 한다.

$$P_x = \tilde{E}_x \cdot \tilde{I}_x = 0 \quad (3)$$

마찬가지로, 각 셀 인버터에 유입(유출)되는 전력(P_{xk})은 해당 셀 인버터의 출력전압(\tilde{E}_{xk})과 상전류의 내적으로 나타낼 수 있는데 이 경우 셀 인버터에 유입(유출)되는 개별 전력들이 모두 영이 되어야 하는 것은 아니며 각각의 직류단전압에 따라 영이나 양의 값, 또는 음의 값을 가질 수 있다.

$$P_{xk} = \tilde{E}_{xk} \cdot \tilde{I}_x \quad (4)$$

하지만, 이러한 경우에도 셀 인버터 전력의 합은 식(3)에 나타낸 바와 같이 항상 영이어야 한다.

$$P_x = \sum_{k=1}^N P_{xk} = 0 \quad (5)$$

셀 평형화 제어기는 측정한 직류단전압(v_{DCrk})이 그 기준치($v_{DCrk(ref)}$)를 추종하도록 아래와 같이 그 차에 비

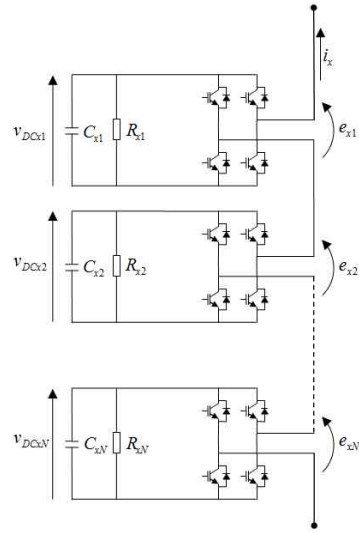


Fig. 2. Equivalent circuit of a phase in STATCOM.

례상수 K를 곱하여 나타낼 수 있으며, 이때 제어기 출력은 셀 인버터의 교류측에서 유입(유출)시켜야 할 유효전력에 해당한다.

$$\delta P_{xk} = K \{ v_{DCrk(ref)} - v_{DCrk} \} \quad (6)$$

각 셀 인버터의 출력전압은 주 제어기에서 전달된 기준전압과 셀간 평형화제어를 위해 셀 인버터에서 추가적으로 발생시키는 증분전압의 합으로 나타낼 수 있는데 그림 3은 이들의 관계를 나타내는 페이지도이다.

$$\tilde{E}_{xk} = \tilde{E}_{xk(ref)} + \delta \tilde{E}_{xk} \quad (7)$$

셀 기준전압은 상전류와 항상 직교관계를 갖기 때문에 각 셀 인버터에 유입(유출)되는 유효전력은 셀간 평형화 제어기의 출력전압과 상전류의 내적만으로 나타낼 수 있다.

$$P_{xk} = (\tilde{E}_{xk(ref)} + \delta \tilde{E}_{xk}) \cdot \tilde{I}_x = \delta \tilde{E}_{xk} \cdot \tilde{I}_x \quad (8)$$

이때 상전류는 STATCOM의 보상성능을 만족하기 위한 변수에 해당하므로 변화시키지 않고 증분전압을 상전류와 평행하게 하면 식(6)에서 요구하는 유효전력은 증분전압의 크기만을 조정하여 발생시킬 수 있다.

$$\delta P_{xk} = \delta \tilde{E}_{xk} \cdot \tilde{I}_x = \delta E_{xk} \cdot I_x \quad (9)$$

이로부터, 셀간 평형화제어기의 출력과 증분전압의 관계는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta E_{xk} = \frac{K}{I_x} \cdot \{ v_{DCrk(ref)} - v_{DCrk} \} \quad (10)$$

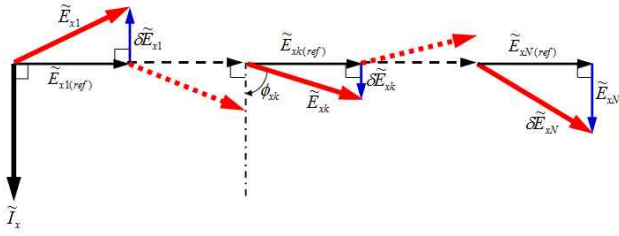


Fig. 3. The voltage phasor of cell inverters in one phase.

식(5)와 식(8)의 관계로부터 흐르는 전류의 크기나 방향에 상관없이 상 전체의 직류단전압이 항상 안정적으로 유지되기 위해선 셀간 평형화제어기의 출력에 해당하는 증분전압의 합이 항상 영이 되어야 한다. 즉,

$$\sum_{k=1}^N \delta E_{xk} = 0 \quad (11)$$

한상 내 모든 셀간 평형화제어기의 기준전압 ($v_{DCrk(ref)}$)은 동일하므로 아래와 같이 그 기준전압이 직류단전압의 평균치로 주어진다면, 식(11)의 관계는 항상 만족된다.

$$v_{DCrk(ref)} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N v_{DCrk} \quad (12)$$

즉, 셀간 평형화제어기의 기준전압을 식(12)와 같이 생성함으로써, 개별 셀 인버터 내에서 셀간 평형화제어기로 인해 발생하는 증분전압은 전체 상의 관점에서는 모두 상쇄되므로 시스템제어에는 전혀 영향을 미치지 않게 되어 아래의 관계를 만족한다.

$$\tilde{E}_x = \sum_{k=1}^N \tilde{E}_{xk} = \tilde{E}_{x(ref)} \quad (13)$$

그림 4는 셀간 평형화제어기의 블록도를 나타낸다. 상 전류와 평행하는 증분전압의 순시치를 구하기 위해 상 전류의 위상을 직접 검출하는 경우, 전류의 크기가 매우 작거나 전류의 위상이 급변할 때 많은 오차가 발생된다. 본 논문에선 상전류와 기준전압이 항상 90°의 위상관계를 갖는다는 점에 착안하여 기준전압에 대해 전대역필터를 적용하여 증분전압의 위상을 검출하였으며, 상전류가 기준전압보다 앞서는지 또는 뒤지는지에 따라 부호를 변경하였다. 본 논문에서 적용한 시스템은 그림 2에서 확인할 수 있듯이 전류가 계통으로 나가는 방향을 양으로 정의하였기 때문에 전류가 기준전압보다 뒤지는 경우에는 (+)부호를, 반대로 앞서는 경우에는 (-)부호를 적용하였다. 또한 상전류의 크기가 거의 영인 부근에서 민감도가 크게 증가하는 것을 방지하기 위해 히스테리

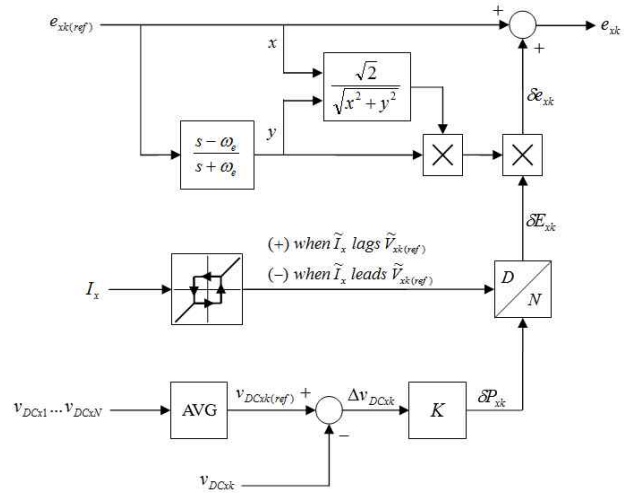


Fig. 4. Cell balancing controller.

시스 함수관계를 갖도록 하였다. 기준전압을 식(2)와 같이 정의하면, 셀간 평형화제어기에 의해 셀 인버터 출력 전압의 순시 값은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$e_{xk} = \frac{\sqrt{2} E_{x(ref)}}{N} \sin \omega_c t \pm \sqrt{2} \delta E_{xk} \cos \omega_c t \quad (14)$$

3. 전류가 작은 경우 셀간 평형화 제어

셀간 평형화제어의 증분전압과 기준전압은 서로 직교관계를 가지므로 최대 증분전압($\delta E_{xk(max)}$)은 직류단전압의 크기로부터 구할 수 있는 셀 인버터의 최대 출력전압($E_{xk(max)}$)과 주 제어기에서 전달된 기준전압($E_{xk(ref)}$)의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta E_{xk(max)} &= \sqrt{E_{xk(max)}^2 - E_{xk(ref)}^2} \\ &= \sqrt{\left\{ \frac{1}{2\sqrt{2}} v_{DCrk} \right\}^2 - E_{xk(ref)}^2} \end{aligned} \quad (15)$$

그림 5는 셀간 평형화제어기가 동작할 때의 교류측 전압과 전류의 파형을 나타낸다. 상전류의 크기가 작지 않을 때에는 ($I_{x(A)}$)의 경우) 비교적 적은 크기의 증분전압($\tilde{E}_{xk(A)}$)을 중첩하여도 셀간 평형화제어를 위해 필요한 유효전력($\delta E_{xk(A)} \cdot I_{x(A)}$)을 생성하는 것이 가능하지만, 전류크기가 적을 때에는 ($I_{x(B)}$)의 경우) 셀 인버터가 출력할 수 있는 범위를 넘는 큰 증분전압($\tilde{E}_{xk(B)}$)을 인가해야만 필요한 유효전력($\delta E_{xk(B)} \cdot I_{x(B)}$)을 발생시킬 수 있다. 하지만, 그림에서 나타난 바와 같이 셀 인버터가 출력할 수 있는 최대 범위($E_{xk(max)}$)를 벗어나서 출력하는 것은 불가능하기 때문에 실제 셀간 평형화제어를 위해 출력되는 유효전력은 $\delta E'_{xk(B)} \cdot I_{x(B)}$ 로 제한됨에 따라

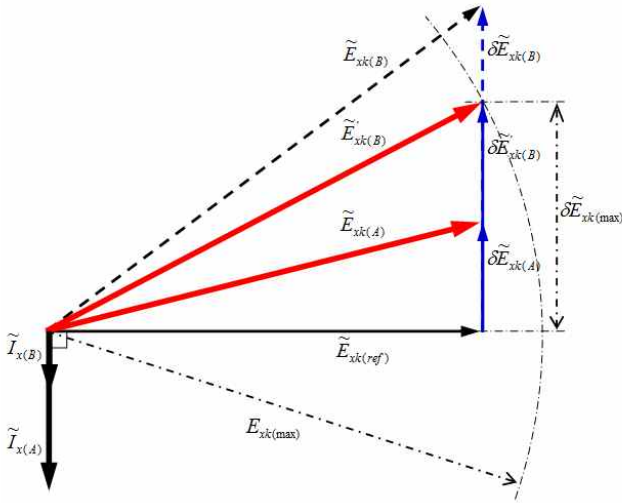


Fig. 5. The output voltage phasor of a cell inverter.

직류단전압을 안정적으로 제어하는 것이 어려워질 뿐 아니라, 셀간 평형화제어로 인해 시스템 전체의 제어가 영향을 받지 않도록 하기 위해선 식(11)의 관계를 항상 만족시키기 위한 별도의 단계가 필요하다. 이는 곧 상전류가 매우 작을 때 셀간 평형화제어를 안정적으로 유지할 수 있는 적절한 조치를 하지 않으면, 전체 시스템이 불안정해지거나 제어능력이 저하됨을 의미한다.

3.1. 무효전력성분의 주입

부하측 정상분 무효전력성분을 보상하기 위한 상전류의 정상분성분을 \tilde{I}_{ap} , \tilde{I}_{bp} , \tilde{I}_{cp} , 불평형 부하를 보상하기 위한 상전류의 역상분성분을 \tilde{I}_{an} , \tilde{I}_{bn} , \tilde{I}_{cn} , 상간 직류단 전압의 불평형을 보상하기 위한 상전류의 영상분성분을 \tilde{I}_0 라 할 때, Δ 결선 STATCOM에서 각 상의 전류는 아래와 같이 해당 상의 정상분성분과 역상분성분, 그리고 영상분성분을 중첩시킨 것으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \tilde{I}_a &= \tilde{I}_{ap} + \tilde{I}_{an} + \tilde{I}_0 \\ \tilde{I}_b &= \tilde{I}_{bp} + \tilde{I}_{bn} + \tilde{I}_0 \\ \tilde{I}_c &= \tilde{I}_{cp} + \tilde{I}_{cn} + \tilde{I}_0 \end{aligned} \quad (16)$$

이때 상전류의 어느 하나라도 그 크기가 매우 작은 경우($I_a \approx 0$ or $I_b \approx 0$ or $I_c \approx 0$) 정상분 무효전력성분을 중첩하는 방안을 생각할 수 있다. 여기서 \tilde{I}_{qcomp} 의 위상은 a상 무효전력성분(\tilde{I}_{qp})과 평행한 관계를 가지며, 크기는 셀간 평형화제어를 가능하게 하는 유효전력을 생성할 수 있는 전류로 설정한다.

$$\begin{aligned} \tilde{I}'_a &= \tilde{I}_a + \tilde{I}_{qcomp} \\ \tilde{I}'_b &= \tilde{I}_b + \tilde{I}_{qcomp} \angle -120^\circ \\ \tilde{I}'_c &= \tilde{I}_c + \tilde{I}_{qcomp} \angle 120^\circ \end{aligned} \quad (17)$$

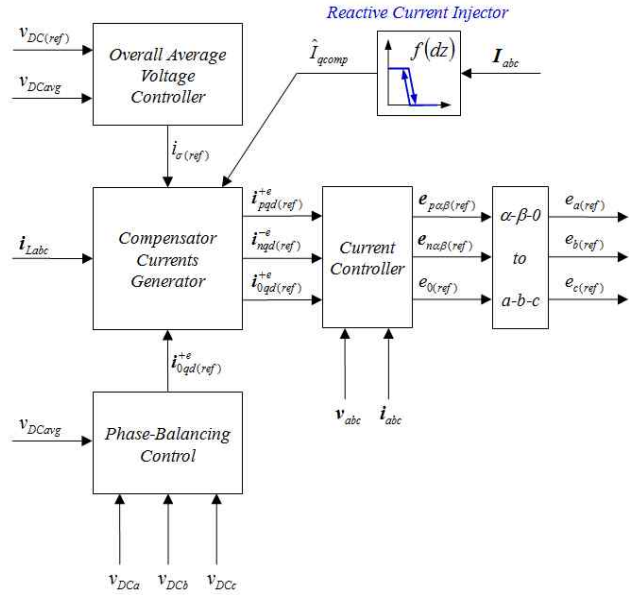


Fig. 6. Reactive power component current injection for cell balancing control in a main controller.

그림 6은 이 방식을 적용한 주 제어기의 제어블록도이다. 주 제어기에는 직류단 커패시터들에 저장되는 정전에너지의 총량을 일정하게 유지시키기 위한 전체 평균 전압제어기와 부하전류로부터 보상할 무효전력성분과 역상분성분을 검출하는 보상전류 검출부, 그리고 각 상별 직류단전압 사이의 편차를 억제하기 위한 상간 평형화 제어기가 있으며 이로부터 정상분 기준전류($i_{pqd(ref)}^{+e}$), 역상분 기준전류($i_{ngd(ref)}^{-e}$), 그리고 영상분 기준전류($i_{0qd(ref)}^{+e}$)가 도출된다. 식(17)의 무효전류성분(\tilde{I}_{qcomp})은 정방향 동기좌표축의 정상분 d축 성분에 해당하기 때문에 아래와 같이 크기를 보정한 후 해당하는 전류성분에 중첩시킬 수 있다. 여기서 $f(dz)$ 는 a-b-c상 전류 중 어느 하나라도 설정치 이하의 크기를 가지면 '1', 그 이상의 크기를 가지면 '0'이 되며 히스테리시스로 동작하는 함수이다.

$$i_{Cpd(ref)}^{+e} = i_{Lpd}^{+e} + \hat{I}_{qcomp} \quad (18)$$

이 경우, 셀간 평형화제어는 안정적으로 동작시킬 수 있지만 STATCOM이 부하전류로부터 검출한 무효전력성분 이외에 추가적인 무효전력을 전력계통에 유입(유출)함에 따라 보상능력의 저하를 초래한다.

3.2. 교번하는 영상분전류의 주입

Δ 결선으로 구성된 STATCOM의 경우, 계통으로 유입되는 보상전류에 영향을 미치지 않는 영상분전류($\tilde{I}_{0comp} = I_{0comp} \angle \phi_{0comp}$)를 아래와 같이 각 상에 동일하게 중첩하는 방식을 고려해 볼 수 있다.

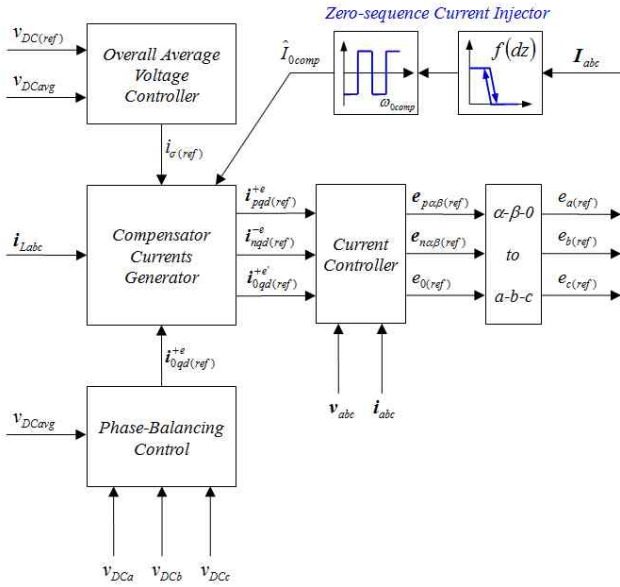


Fig. 7. Zero sequence current injection for cell balancing control.

$$\begin{aligned}\tilde{I}_a &= \tilde{I}_a + \tilde{I}_{0comp} \\ \tilde{I}_b &= \tilde{I}_b + \tilde{I}_{0comp} \\ \tilde{I}_c &= \tilde{I}_c + \tilde{I}_{0comp}\end{aligned}\quad (19)$$

이때 각 상의 전력은 양단 전압(\tilde{V}_{ab} , \tilde{V}_{bc} , \tilde{V}_{ca})과 상전류의 내적으로 나타낼 수 있다. 그림 1에서 계통의 선간 전압이 V 인 3상 대칭이라 하고 원래의 상전류들(\tilde{I}_a , \tilde{I}_b , \tilde{I}_c)는 이미 선간전압과 직교하기 때문에 각 상의 전력은 중첩한 영상분 전류와 해당 선간전압과의 내적만으로 나타난다.

$$\begin{aligned}P_a &= \tilde{V}_{ab} \cdot \tilde{I}_a = VI_{0comp} \cos(\phi_{0comp}) \\ P_b &= \tilde{V}_{bc} \cdot \tilde{I}_b = VI_{0comp} \cos\left(\phi_{0comp} - \frac{2\pi}{3}\right) \\ P_c &= \tilde{V}_{ca} \cdot \tilde{I}_c = VI_{0comp} \cos\left(\phi_{0comp} + \frac{2\pi}{3}\right)\end{aligned}\quad (20)$$

즉, 중첩한 영상분전류의 크기(I_{0comp})와 위상(ϕ_{0comp})에 따라 각 상별 다른 크기와 부호를 갖는 유효전력이 발생하게 되며, 이로 인해 각 상의 직류단전압은 계속 상승하거나 하강하게 된다. 이는 본 논문에서 구현한 영상분전류를 이용한 상간 평형화제어기^[11]의 동작과 충돌하는 문제를 일으킨다.

본 논문에선 상간 평형화제어기의 응답주파수(ω_{pk})보다 최소 10배 이상 빠른 주파수(ω_{0comp})로 영상분전류의 극성을 교번시킴으로써 상간 평형화제어기와 충돌을 회피하면서 셀간 평형화제어에 필요한 크기의 전류를 흐르게 할 수 있다. 영상분 전류는 정방향 동기좌표축의 영상분 d-q축 성분^[12]에 해당하며 아래 식과 같이 크기

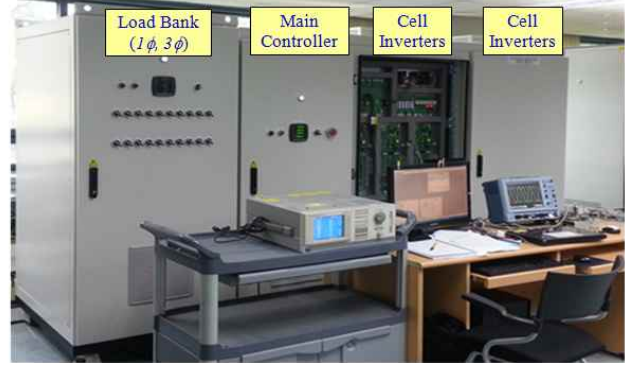


Fig. 8. 30 kVA, 440 V STATCOM experimental setup.

TABLE I
SYSTEM PARAMETERS OF A STATCOM

system parameters	values
cascaded multi-level configuration	Δ -connection
rated power	30 [kVA]
rated voltage	440 [V]
rated current	39.4 [A]
dc-side voltage of each phase	800 [V]
cell inv. numbers of each phase(N)	6
switching frequency of each cell inv.	960[Hz]
pulse-width modulation	phase-shifted

를 보정하여 중첩시킬 수 있다.

$$\tilde{i}_{0qd}^{+e'} = \tilde{i}_{0qd}^{+e} + \hat{I}_{0comp}\quad (21)$$

그림 7은 이상에서 설명한 바와 같이, 안정적인 셀간 평형화제어를 위해 주 제어기에서 영상분 전류를 주입하는 방식을 나타낸다.

4. 실험

본 논문에서 제안하는 셀간 직류단전압 평형화제어 알고리즘은 표 1과 같이 Δ 결선의 다단 H-브릿지 토폴로지를 갖는 440 V, 30 kVA 용량의 시험용 STATCOM 시스템에 적용하여 검증하였다. 이 시스템은 각 상별 6개의 셀 인버터로 구성하였으며 PSPWM 방식을 적용하여 스위칭 제어를 하였다. 그림 8은 시험에 사용된 장치의 사진이다.

셀간 직류단전압 평형화제어기의 특성을 고찰하기 위해 그림 9는 STATCOM이 1.0 pu의 무효전력을 보상하고 있을 때 셀간 평형화제어기의 동작 전, 후의 파형을 보여준다. 각 셀 인버터간 시스템 손실이나 파라미터의 차이로 인해 평형화제어 전에는 직류단전압들($v_{DCa1} \sim$

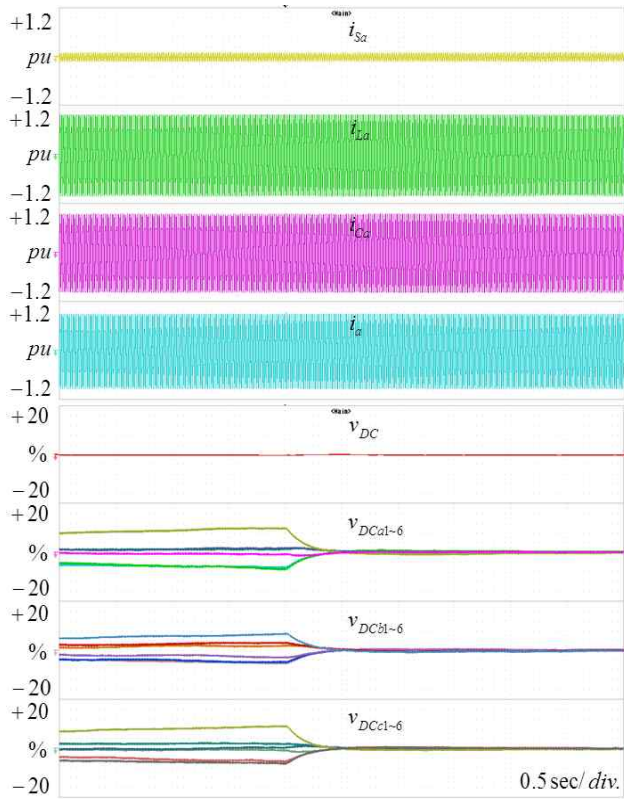


Fig. 9. Experimental results : The operation of cell balancing controllers.

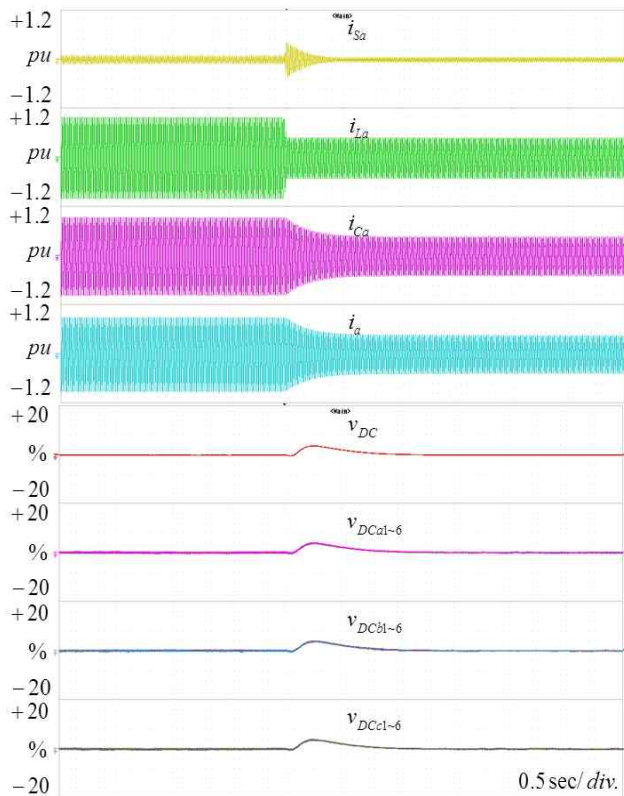


Fig. 10. Experimental results : The dynamics of cell balancing controllers (from 1.0 pu to 0.5 pu).

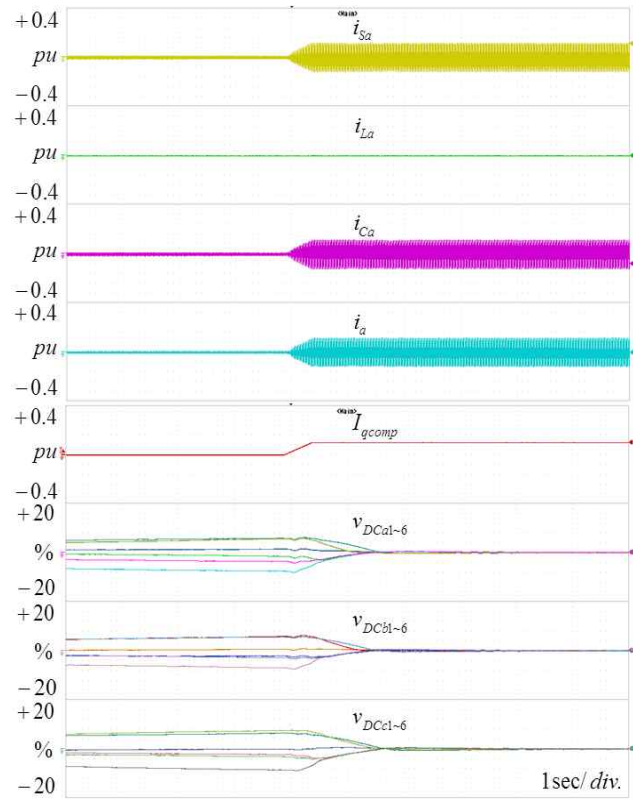


Fig. 11. Experimental results : The reactive current injection method at very small current.

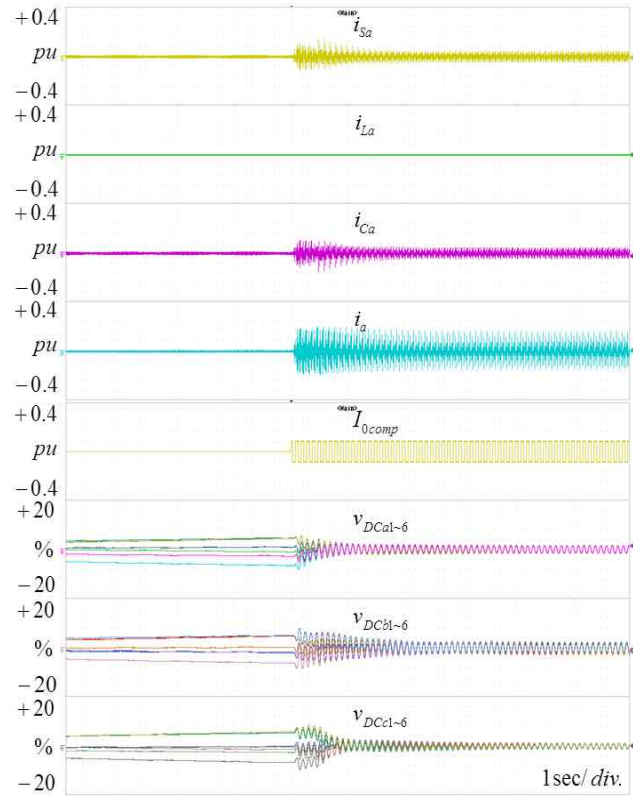


Fig. 12. Experimental results : The zero-sequence current superposition method at very small current.

v_{DC6}) 간에 편차가 발생하지만 제어 이후에는 편차가 제거되는 것을 알 수 있다. 이때 셀간 평형화제어는 각 상의 전체 출력전압에 전혀 영향을 미치지 않으므로 STATCOM 출력전류는 이로 인한 변동이 거의 발생하지 않음을 확인할 수 있다. 그림 10은 무효전력부하를 1.0 pu에서 0.5 pu로 변동하였을 때의 셀간 평형화제어 성능을 나타낸다. 파형에서 알 수 있듯이, 전류를 급격히 변동하는 경우에도 셀간 평형화제어는 안정적으로 동작함을 알 수 있는데 이는 제어기를 설계할 때 전류 크기나 위상변동에 대한 고려가 이미 되어 있기 때문이다.

그림 11과 그림 12는 무부하 상태($I_x \approx 0$)에서 셀간 평형화제어의 동작특성을 나타낸다. 그림 11은 약 10%의 크기를 갖는 무효전력성분의 전류를 주입하였을 때의 동작특성을 나타낸다.(그림 6) 이로 인해, 셀간 직류단전압은 안정적으로 제어가 되었지만 계통측에는 원치 않는 무효전력성분의 전류가 유입되는 것을 확인할 수 있다. 그림 12는 교변하는 영상분 전류를 주입하였을 때의 동작특성을 나타내며(그림 7) 약 8% 크기의 영상분 전류를 중첩하였다. 이때 상간 평형화제어기의 차단 주파수가 5 rad/sec인 것을 감안하여 영상분 전류의 교변 주파수는 이보다 10배 이상인 10 Hz(약 63 rad/sec)로 설정하였다. 각 셀 인버터의 직류단전압은 주입하는 영상분 전류에 의해 맥동되지만 그 맥동 폭은 셀 인버터가 제어성을 유지하는 범위 내에 머물기 때문에 전체 시스템은 안정적으로 제어됨을 확인할 수 있다. 또한 이 영상분 성분은 전력계통에 전혀 유입되지 않기 때문에 STATCOM의 보상성능에는 영향을 미치지 않으며, 단지 Δ 결선 내부에서 순환함을 알 수 있다.

5. 결 론

다단 H-브릿지 STATCOM은 고압 대용량화에 유리한 반면 많은 수의 직류단이 서로 분리되어 있는 구조로 인해 직류단전압들 사이에 불평형 문제가 야기할 수 있다는 취약점을 지니고 있다. 셀 인버터들 간의 직류단전압은 교류 전압의 조정을 통해 유입(유출)되는 유효전력을 제어함으로써 일정하게 유지할 수 있는데, 이때 흐르는 전류의 크기가 매우 작은 영역에서는 셀 인버터의 제어범위를 벗어나는 전압이 필요하게 됨에 따라 직류단전압을 안정적으로 유지하는 것이 어려워진다.

이에 대한 방안으로 임의의 전류를 주입하는 방식을 고려할 수 있다. 이 중 본 논문에서 제안한 영상분 전류를 교변하여 주입하는 경우, 전력계통에 전혀 영향을 미치지 않으며 셀간 평형화를 안정적으로 구현하는 것이 가능함을 실험을 통해 확인하였다.

References

- [1] F. Z. Peng, J. S. Lai, J. McKeever, and J. VanCoevering, "A multilevel voltage-source inverter with separate DC sources for static var generation," in *Proc. Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting*, pp. 2541 - 2548, 1995.
- [2] F. Z. Peng, J. W. McKeever, and D. J. Adams, "A power line conditioner using cascaded multilevel inverters for distribution systems," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 34, No. 6, pp. 1293-1298, Nov./Dec. 1998.
- [3] Y. Liang and C. O. Nwankpa, "A new type of STATCOM based on cascading voltage-source inverters with phase-shifted unipolar SPWM," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 35, No. 5, pp. 1118 - 1123, Sep./Oct. 1999.
- [4] H. Akagi, S. Inoue, and T. Yoshii, "Control and performance of a transformerless cascade PWM STATCOM with star configuration," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 43, No. 4, pp. 1041-1049, Jul./Aug. 2007.
- [5] N. Hatano and T. Ise, "Control scheme of cascaded H-bridge STATCOM using zero-sequence voltage and negative-sequence current," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 25, No. 2, pp. 543-550, Apr. 2010.
- [6] R. E. Betz and T. J. Summers, "Using a cascaded H-bridge STATCOM for rebalancing unbalanced voltages," in *Proc. 7th Int. Conf. Power Electron.*, pp. 1219 - 1224, 2007.
- [7] M. Hagiwara, R. Maeda, and H. Akagi, "Negative-sequence reactive-power control by a PWM STATCOM based on a modular multilevel cascaded converter(MMCC-SDBC)," in *Conf. Rec. IEEE-ECCE 2011*, pp. 3728-3735, 2011.
- [8] J. A. Barrena, L. Marroyo, M. Vidal, and J. Apraiz, "Individual voltage balancing strategy for PWM cascaded H-bridge converter-based STATCOM," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 55, No. 1, pp. 21-29, Jan., 2008.
- [9] Y. Li and B. Wu, "A novel DC voltage detection technique in the CHB inverter-based STATCOM," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 23, No. 3, pp. 1613-1619, Jul. 2008.
- [10] Z. Liu, B. Liu, S. Duan, and Y. Kang, "A novel dc capacitor voltage balance control method for cascaded multilevel STATCOM," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 27, No. 1, pp. 14-27, Jan. 2012.
- [11] B. K. Kwon, S. K. Jung, and T. H. Kim, "Control of DC-side voltage unbalance among phases in multi-level H-bridge STATCOM with unbalanced load," *The Trans. of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 19, No. 4, pp. 332-341, Aug. 2014.
- [12] B. Bahrani, A. Rufer, S. Kenzelmann, and L. Lopes, "Vector control of single-phase voltage-source converters based on fictive-axis emulation," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 47, No. 2, pp. 831-840, Mar./Apr. 2011.



권병기(權炳基)

1970년 12월 5일생. 1993년 광운대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 졸업(석사). 2011년~현재 동 대학원 박사과정. 1995년~현재 (주)포스코ICT R&D센터 제어시스템연구그룹장.



정승기(鄭勝基)

1960년 3월 26일생. 1982년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 졸업(석사). 1988년 동 대학원 졸업(공학박사). 1987년~현재 광운대 전기공학과 교수.



김태형(金泰亨)

1983년 7월 2일생. 2008년 광운대 전기공학과 졸업. 2010년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2010년~현재 (주)포스코ICT R&D센터 선임연구원.