

하이브리드 타입 커패시터 뱅크를 이용한 공급신뢰도 및 전력품질 개선 방안 연구

A Study on the Service Reliability and Power Quality Improvement Using Hybrid Type Capacitor Bank

이 한 상 *, 윤 동 희**★

Hansang Lee*, Dong-Hee Yoon**★

Abstract

The objectives of power system operations are to preserve system stability and reliability as well as to supply proper electric power. For an activation of these objectives, voltage and reactive power should be considered. There are a number of types about reactive power sources, and an insertion of shunt capacitor banks are one of the method to support bus voltage adjacent. This paper includes the design procedure to determine the hybrid type capacitor bank configurations on power system to improve stability and reliability. This procedure includes the capacitor bank capacity calculation, reactor type selection, and reactor capacity calculation. The total capacity calculation of capacitor bank is based on the reactive power margin which is calculated through system studies such as, contingency analysis and Q-V analysis. In the second step, the reactor type and its capacity can be determined through the harmonic analysis. This paper shows that the harmonics are decreased by the proposed hybrid type capacitor bank, especially 5th and 7th harmonics.

요 약

전력계통운영의 목표는 전력시스템의 안정성과 신뢰성을 유지하여 원활한 전력을 공급하는 것이다. 안정적인 전력 공급을 위하여 무효전력과 모션 전압에 대한 고려를 해야 하는데, 모션의 전압을 일정 범위 이내로 유지하기 위하여 커패시터 뱅크를 비롯한 다양한 방안이 사용되고 있다. 본 논문에서는 계통 안정도와 전력공급 신뢰도를 향상시키기 위한 하이브리드 타입의 커패시터 뱅크 설계 과정에 대하여 기술하였다. 설계 과정에는 커패시터 뱅크의 용량 산정, 리액터 타입 결정 및 리액터 용량 산정과정도 포함된다. 기존의 커패시터 뱅크의 설계과정과 같이 정상상태 Q-V 해석이나 상정사고 분석과 같은 방법을 통하여 무효전력 마진을 계산하여 저전압이 발생하는 모션에 무효전력 보상량을 산정한다. 그리고 고조파 실측을 통해 산출된 개별 고조파의 성분 크기를 기반으로 직렬 리액터의 크기를 산정하는 방식으로 설계과정을 제안하였다. 논문에서는 제안된 방법을 통하여 고조파의 크기가 감소함을 증명하였으며, 특히 5차와 7차 고조파의 저감에 효율적임을 보여주었다.

Key words : Hybrid type capacitor bank, Reliability, Reactive power margin analysis, Power quality, Harmonic distortion

* School of Electrical & Railway Engineering, Kyungil University, hslee80@kiu.ac.kr, 053-600-5525

**★ Department of New & Renewable Energy, Kyungil University, dhyoon@kiu.ac.kr, 053-600-5383

※ Acknowledgment

This work was supported by the Power Generation & Electricity Delivery Core Technology Program of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) granted financial resource from the Ministry of Trade, Industry & Energy, Republic of Korea (No. 20131020000100)

Manuscript received Jul. 28, 2014; revised Aug. 28, 2014; accepted Sep. 2, 2014

I. 서론

최근 전기부하의 증가는 과거 예상했던 수준 이상으로 급격히 증가하고 있다. 부하의 증가는 수급의 측면에서 발전소와 송전선로의 추가 건설을 통해 대응이 가능하지만, 운영의 측면에서 무효전력에 관한 충분한 고려가 필요하다. 특히 국내와 같이 발전단과 부하단의 구분이 확연하고 지역적으로 멀리 떨어진 경우, 모선 전압의 유지 또는 송전 효율 확보를 위하여 무효전력 보상장치에 관한 관심이 높아지고 있다.

전력계통을 설계하고 운영함에 있어 무효전력은 계통 전압 유지와 관계가 있고, 전압유지는 전체적인 계통의 원활한 운영에 밀접한 관계가 있다 [1]. 전력계통 내에 운전되고 있는 설비 중에 무효전력을 능동적으로 공급할 수 있는 설비는 발전기가 대표적이다. 그러나 송전선의 리액턴스에 의한 손실로 인하여 발전기에서 공급하는 무효전력만으로 발전단에서 수전단까지 원활한 전력공급을 가능케 하는 것은 불가능하다. 이에 수전단까지의 공급경로에 무효전력을 공급할 수 있는 설비를 설치하는데, 그 중 가장 대표적인 설비가 커패시터 뱅크이다. 최근 SVC (Static VAR compensator) 또는 STATCOM (Static synchronous condenser) 등의 유연한 무효전력 공급이 가능한 FACTS (Flexible AC Transmission System) 설비에 대한 관심이 높아지고 있다. 그러나 이러한 FACTS 설비는 초기 설치비용이 매우 높고 높은 유지보수 비용을 필요로 하기 때문에 전압 문제가 발생하는 모든 모선에 설치를 고려하기는 경제적으로 적절하지 않다. 커패시터 뱅크의 경우, ON/OFF 개념의 무효전력 보상장치이지만, 초기 투자비용이 낮고 운영이 쉽다는 점에서 선호하는 무효전력 보상 장치의 하나이다.

전력전자소자가 응용된 컨버터를 포함하는 부하의 비중이 높아짐에 따라 송전계통에서의 전력품질에 대한 관심이 높아지고 있다. 고조파에 의한 전력품질 문제는 주로 배전계통에서 이슈로 다루었지만, 최근 송전계통에서도 큰 이슈가 되고 있다. 또한, 송전계통에서 발생하는 고조파는 커패시터 뱅크에 의하여 확대될 가능성이 존재한다. 커패시터 뱅크의 무효전력 보상 원리는 병렬로 접속된 용량성 리액턴스를 이용하는 방식이기 때문에 특정 성분의 고조파에 대하여 확대를 일으킬 가능성이 매우 높다. 이에 본 논문에서는 기존의 커패시터 뱅크를 통해 구현되었던 모선 전압 보상 동작 뿐 만 아니라 특정 차수의 고조파 확대를 방지하기 위하여 고조파 필터로 동작할 수 있는 하이브리드 타입의 커패시터 뱅크를 구성해야함을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 증명하고, 설계 과정을 제안하였

다. 제안된 과정을 통해 설계된 하이브리드 타입 커패시터 뱅크를 실제계에 적용하여 공급신뢰도 및 전력품질 개선 효과를 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

II. 무효전력 마진 해석

전력계통이 정상상태에 있거나 또는 외란에 의한 동요가 발생하였을 경우, 모든 모선의 전압을 규정된 범위에 유지할 수 있는 능력을 전압 안정도라고 한다. 계통의 전압유지를 위해서는 무효전력을 필요로 하는데, 계통에 문제가 생겨 전압유지를 위한 무효전력의 수요를 만족시키기 못할 때 전압 불안정 상태가 된다. 일반적으로 충분한 무효전력의 여유가 있으면 계통은 안정한 전압 수준에 머무르게 되지만, 사고에 의해 발생하는 사건들과 변화된 계통 상태들의 조합으로 인해 추가적인 무효전력 수요가 발생할 수 있다. 이러한 수요가 무효전력 공급능력의 한계를 넘어 서면 계통의 일부 또는 전체에 정전을 일으키는 전압 붕괴를 발생시킨다 [2].

전압 불안정은 본래 지역적으로 나타나는 현상이지만 그 결과는 광역적으로 영향을 미친다. 전압 붕괴는 전압 불안정을 일으키는 이벤트가 연속적으로 발생하여 전력 계통의 상당한 부분에서 불안정한 낮은 전압을 이끌어 내는 과정이다. 앞서 언급한 것과 같이 전압 불안정 및 전압 붕괴 현상은 시스템의 무효전력 수급과 밀접한 관련이 있으며 무효전력을 충분히 공급하기 위해 현재의 무효전력 여유분에 대한 해석이 필수적이다 [3].

본 논문에서는 지정된 계통 조건에서의 전압 안정도 분석을 위하여 Q-V 곡선을 이용하였다. Q-V 곡선은 전력 조류 분석에 기초하는 방안이며, 특정 모선에서 전압을 조절하기 위하여 필요한 무효전력량을 결정할 수 있다 [4]. Q-V 곡선의 개념은 다음의 그림에서 확인할 수 있다.

분석할 모선에 무효전력 공급이 가능한 가상의 설비(무효전력만 발전이 가능한 발전기)가 있다고 가정하고, 모선의 전압을 변동시키면서 설비가 공급하는 무효전력량을 이용하여 Q-V 곡선을 도출한다. Q-V 곡선에서 임계점은 그림에 있는 곡선의 꼭지점을 의미하며, dQ/dV 의 값이 0이 되는 지점을 의미한다. 임계점을 기준으로 좌측은 불안정, 우측은 안정을 의미하며 임계점을 전압붕괴점으로 표현하기도 한다. 그림 1에서 무효전력 여유는 현재 운전점(운전전압) B에서 임계점까지의 무효전력량이 된다. 만약 운전점이 A가 된다면 무효전력값이 음의 값이기 때문에 무효전력이 여유가 있다는 의미이며, 운전점이 C가 된다면 무효전력이 부족한 상태이기 때문에 추가적인

무효전력의 투입이 필요한 상황이 된다. C점에서 그래프가 나타내는 무효전력값이 계통의 전압 안정도 유지를 위해 필요한 무효전력량이 된다.

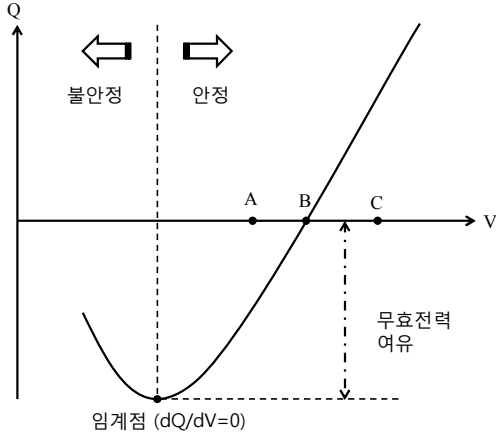


Fig. 1. Conceptual curve for Q-V
그림 1. Q-V 곡선 개념도

전압 붕괴의 방지를 위해서는 계통의 변화에 따른 무효전력 수요를 충분히 감당할 수 있도록 무효전력 여유가 확보되어야 한다. 대표적인 무효전력 공급방법으로는 셉트 커패시터, FACTS, 동기 조상기와 같은 방안이 있다. 보상 장치의 적절한 선택은 시스템에 충분한 안정도 여유를 제공할 수 있으며, 보상 장치의 크기와 위치의 선정은 해당 시스템에 대한 충분한 이해와 연구가 행해진 후에 결정되어야 한다.

III. 하이브리드 타입 커패시터 뱅크 설계

2절의 무효전력 여유 해석을 통해 커패시터 뱅크 용량을 산정하고, 이를 바탕으로 각 상의 커패시터, 리액터의 크기를 결정할 수 있다. 사례연구에서 대상으로 하고 있는 송전계통에서 132kV 모선에 설치를 고려하고 있기 때문에, 그림 2에 132kV 정격의 커패시터 뱅크의 구성도를 나타내었다. 커패시터 뱅크에 사용되는 커패시터는 축전용량이 커짐에 따라 비용이 급격하게 높아지기 때문에 그림 2와 같이 Y결선이 아닌 Δ결선으로 구성하지만, 커패시터의 리액턴스를 산정하는 과정을 이후에 설명하기 위하여 Y결선으로 표현하였다. 그림 2에 표시된 용량성 리액턴스와 유도성 리액턴스의 비율, α는 확대의 우려가 있거나 높은 비중을 가지는 고조파의 차수에 따라 결정된다.

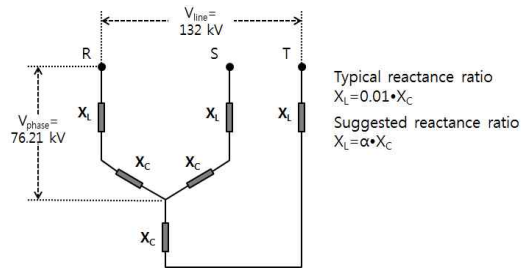


Fig. 2. Configuration of capacitor bank
그림 2. 커패시터 뱅크 구성도

특정 용량의 무효전력을 공급하기 위한 커패시터 뱅크의 총 리액턴스는 식 (1)과 같이 계산될 수 있다 [2]. 본 논문에서 제안하는 하이브리드 타입 커패시터 뱅크는 병렬 커패시터와 직렬로 접속되는 리액터를 고려하고 있으며, 계통에 존재하는 고조파의 상태에 따라 용량성 리액턴스의 일정 비율의 리액턴스 크기를 가지는 리액터의 크기를 산정하여야 한다. 리액터 값의 결정은 식 (2)~(4)에 나타내었다.

$$X_{total} = \frac{(V_{LLrms})^2}{Q_{total}} \tag{1}$$

$$X_{total} = |X_C - X_L| \tag{2}$$

$$X_L = \alpha \times X_C \tag{3}$$

$$X_C = \frac{1}{(1-\alpha)} \times X_{total} \tag{4}$$

식 (3)과 (4)에 적용되는 유도성 리액턴스와 용량성 리액턴스의 비율 α는 하이브리드 타입 커패시터 뱅크의 적용을 고려하는 대상 계통의 고조파 상태를 고려하여 결정된다. 식 (3)과 (4)를 이용하면, 커패시터 뱅크 내의 리액터의 값(mH)과 커패시터의 값(uF)이 결정되는데, 이 값은 60Hz 성분의 정상성분에 대해서는 식 (3)과 (4)에서 도출된 리액턴스 값을 가지지만, 다른 주파수 성분에서는 각각 다른 리액턴스 값으로 반영된다. 즉, 식 (3)과 (4)를 통해 산정된 리액터와 커패시터의 값이 각각 L과 C라고 할 때, 주파수에 따른 두 요소의 리액턴스는 식 (5), (6)과 같다. 식 (6)에서 보는 바와 같이 커패시터에 의한 리액턴스는 음의 부호를 갖게 되는데, 이것은 전압 실효치의 제공에 해당하는 값과 곱쳐져 해당 값만큼의 무효전력이 공급되는 것을 의미한다.

$$X_L = j2\pi fL \quad (5)$$

$$X_C = \frac{1}{j2\pi fC} = -\frac{j}{2\pi fC} \quad (6)$$

$$X_{total} = j2\pi fL + \frac{1}{j2\pi fC} = \frac{-4\pi^2 f^2 LC + 1}{j2\pi fC} \quad (7)$$

커패시터 뱅크의 하나의 브랜치가 가지는 전체 리액턴스는 식 (7)과 같다. 식 (7)에서 특정 주파수에 대하여 전체 리액턴스가 0가 되는데, 이것은 해당 주파수 성분의 전류에 대하여 임피던스가 0인 브랜치가 생성되어 해당 주파수의 고조파 전류를 흡수할 수 있음을 의미한다. 따라서 유도성/용량성 리액턴스 비(α)와 제거하고자 하는 고조파의 차수(h)의 관계는 식 (8)과 같다.

$$\alpha = \frac{1}{h^2} \quad (8)$$

IV. 사례연구

하이브리드 타입 커패시터 뱅크의 무효전력 보상에 의한 전압 보상 및 고조파 제거에 의한 전력품질 개선 효과를 검증하기 위하여, 실제통을 대상으로 사례 연구를 수행하였다. 대상인 실제통은 큰 부하가 연계되어 있으며 모선전압 변동 허용 범위의 0.95~1.1pu를 벗어날 우려가 있는 모선(N88120)을 포함한 계통을 선정하였다. 그림 3은 관심 모선을 중심으로 등가 축약을 수행한 PSCAD/EMTDC 계통도이다.

1. 무효전력 마진

하계 피크에 대한 부하데이터를 기반으로 그림 3의 계통에 대한 조류계산이 수행되었으며, N88120 모선 및 주위 모선전압이 모선전압 하한치인 0.95pu 인근에서 운전되고 있는 것으로 해석되었다.

Q-V 곡선을 이용하여 모선에 필요한 커패시터 뱅크의 용량을 산정하였다. 그림 4는 N88120 모선 및 인근 모선의 부하량을 변화시켜가며 추출한 Q-V 곡선을 나타낸 것이다. 그림 4를 통해 N88120 모선은 55.90MVar만큼의 무효전력이 부족한 상태로 운전되

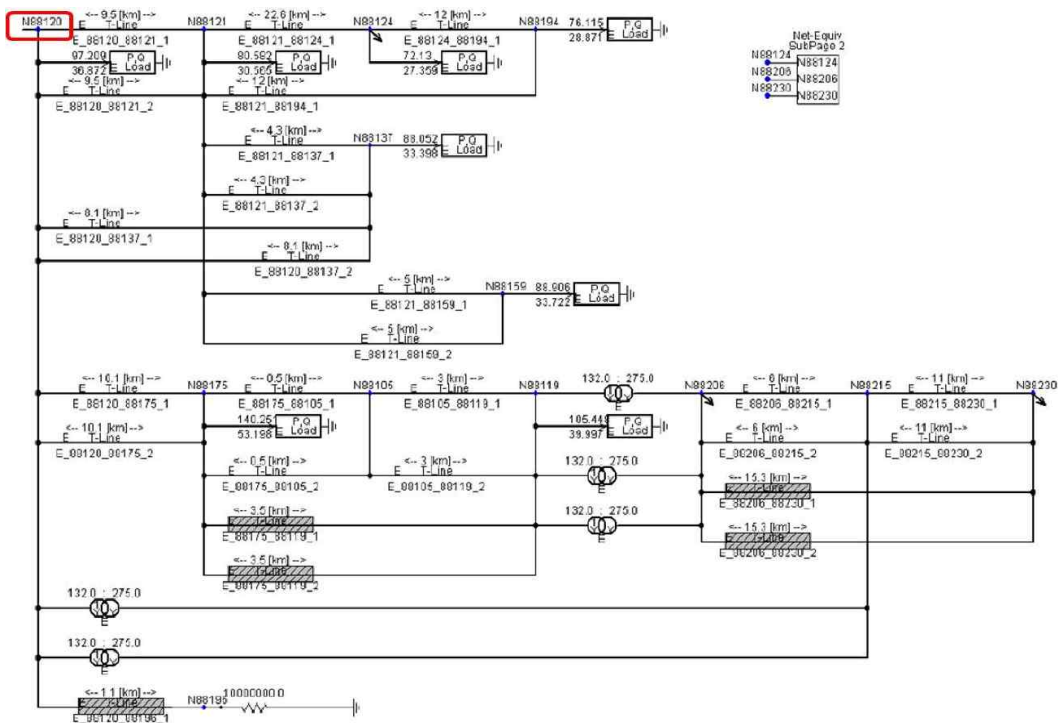


Fig. 3. Equivalently reduced power system from real power system
 그림 3. 실제통 기반의 등가축약 계통도

고 있음을 알 수 있다. 따라서 N88120 모선의 전압을 1.0 pu로 유지하기 위하여 60 MVar의 커패시터 뱅크의 설치를 고려하도록 한다.

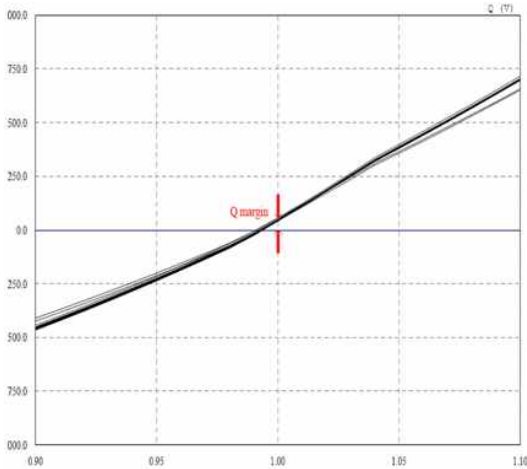


Fig. 4. Reactive power margin analysis for N88120 bus
 그림 4. N88120 모선에 대한 무효전력 마진 해석

Table 1. Measured background harmonic spectrum

표 1. 측정된 상시 고조파 스펙트럼

고조파 차수 (주파수)	크기[A]	위상각[Deg]
5차(300Hz)	20.1900	263.23
7차(420Hz)	12.0200	65.18
13차(780Hz)	1.0678	331.67
17차(1,020Hz)	2.0673	80.20
19차(1,140Hz)	1.3318	228.26
21차(1,260Hz)	1.2532	129.56
23차(1,380Hz)	0.5607	213.17

2. 고조파 실측

실측을 통해 계통에서 상시로 측정되는 고조파에 대한 분석을 수행하여 표 1에 나타내었다. 대상 계통은 5차와 7차 고조파가 가장 높은 크기로 포함되어 있는 계통이며, 하이브리드 타입 커패시터 뱅크를 설치하고자 할 때 해당 고조파를 제거할 수 있는 직렬 리액터의 설치가 필요하다. 표 1의 상시고조파 이외에 각 모선에서 측정된 고조파 전류를 주입하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

3. 무효전력 마진

커패시터 뱅크 설치 전의 계통에 대한 정상상태 해석을 통하여 60 MVar의 커패시터 뱅크가 필요하고, 5차와 7차의 고조파를 병렬공진없이 제거하기 위하여 4차 단일동조 필터로 커패시터 뱅크를 설계하였다. h 값이 4인 경우에 대한 필터를 구성하기 위해서는 식 (8)을 이용하여 α값을 약 0.06으로 선정하여 설계하였다[5-6]. 식 (1)~(4)를 이용하여 내부 파라미터를 다음과 같이 산정하였다.

- 하이브리드 타입 커패시터 뱅크 파라미터

$$X_{total} = \frac{(132 \times 10^2)}{60 \times 10^6} = 290.4\Omega \quad (9)$$

$$X_C = \frac{290.4}{1-0.06} = 308.93\Omega \quad (10)$$

$$C = \frac{1}{\omega X_C} = 8.59\mu F \quad (11)$$

$$X_L = 0.06 \times 290.4 = 18.53\Omega \quad (12)$$

$$L = \frac{X_L}{\omega} = 49.15mH \quad (13)$$

$$Q_C = \frac{V_C}{X_C} \times 3 = 63.81MVar \quad (14)$$

$$Q_X = \frac{V_L}{X_L} \times 3 = 3.81MVar \quad (15)$$

- 일반 커패시터 뱅크 파라미터

$$X_C = \frac{290.4}{1-0.001} = 290.69\Omega \quad (16)$$

$$C = \frac{1}{\omega X_C} = 9.125\mu F \quad (17)$$

$$X_L = 0.001 \times 290.4 = 0.2904\Omega \quad (18)$$

$$L = \frac{X_L}{\omega} = 0.7703mH \quad (19)$$

Table 2. Powerflow simulation result for peak load condition with capacitor bank[pu]

표 2. 커패시터 뱅크 설치 후 피크부하 조건에서의 조류 계산 결과[pu]

모선번호	No bank	General C-bank	Hybrid C-bank
N88120	0.959	1.000	0.999
N88121	0.959	0.999	0.998
N88175	0.961	0.999	0.999

커패시터 뱅크 설치 전과 후의 조류계산 해석 결과를 표 2에 나타내었다. 두 타입의 커패시터 뱅크 모두 N88120 모선 뿐 만 아니라 인근 모선의 전압을

Table 3. Comparison of THD analysis results
표 3. 커패시터 뱅크 설치 전후의 THD 결과 비교

모선번호	No bank	General C-bank	Hybrid C-bank
N88120	0.8599	1.1135 (129.5%)	0.6661 (77.46%)
N88121	0.9970	1.1638 (116.7%)	0.8433 (84.58%)
N88175	1.0211	1.1646 (114.1%)	0.8811 (86.29%)

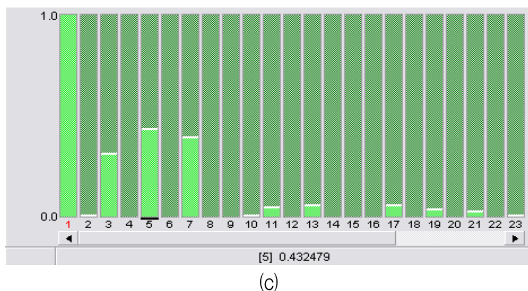
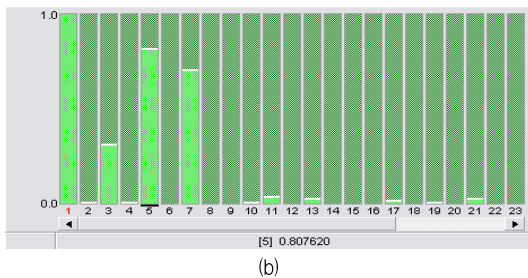
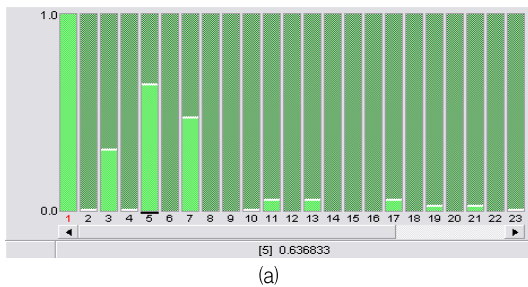


Fig. 5. Harmonic spectrum (a) no bank (b) general C-bank (c) hybrid C-bank

그림 5. 고조파 스펙트럼 (a) 커패시터 뱅크 설치 전 (b) 기존 커패시터 뱅크 설치 후 (c) 하이브리드 타입 커패시터 뱅크 설치 후

1.0 pu까지 보상함을 볼 수 있다.

송전 계통 내의 THD 해석 결과를 표 3에 나타내었다. 커패시터 뱅크를 필터 타입으로 설계하여 설치함에 따라, 커패시터 뱅크가 설치된 N88120 모선에서 저감율이 22.54%로 가장 높고, 인근 모선에서도 15.42%와 13.71%의 저감율을 나타내었다. 그러나 일반적인 형태의 커패시터 뱅크의 경우, 고조파 전압을 확대하는 것으로 해석되었다. 이것은 고조파 발생 부하의 지속적 증가와 더불어 앞으로 필터 동작의 커패시터 뱅크에 대한 요구가 높아질 것임을 의미한다.

Table 4. Comparison for each order of voltage harmonics at N88120(kV)

표 4. N88120 모선에서의 전압 고조파 차수별 해석 결과 비교(kV)

고조파 차수	No bank	General C-bank	Hybrid C-bank
3차(180Hz)	0.302	0.303	0.299
5차(300Hz)	0.637	0.808	0.432
7차(420Hz)	0.469	0.695	0.338
11차(660Hz)	0.078	0.040	0.069
13차(780Hz)	0.078	0.027	0.082
17차(1020Hz)	0.085	0.020	0.084

THD의 변화는 그림 5와 표 4에 자세히 나타내었다. 기존 형태의 커패시터 뱅크(그림 5b)의 경우, 5차와 7차 고조파 성분의 확대와 11차 이상의 고조파 성분의 저감을 확인할 수 있다. 이와 반대로, 하이브리드 타입 커패시터 뱅크(그림 5c)의 경우, 5차와 7차의 제거를 목적으로 설계되었기 때문에 해당 고조파를 상당 부분 저감시킴으로서 전력품질 향상을 구현할 수 있음을 볼 수 있다.

V. 결론

송전계통에서 모선 저전압 문제와 전력품질 문제를 동시에 해소하기 위하여, 무효전력 보상 및 고조파 필터의 동작을 동시에 수행할 수 있는 하이브리드 타입 커패시터 뱅크의 설치 및 설계 과정을 제안하였다. 기존의 커패시터 뱅크의 설계과정과 같이 정상상태 Q-V 해석을 통해 무효전력 마진을 계산하여 저전압이 발생하는 모선에 무효전력 보상량을 산정하고, 고조파 실측을 통해 산출된 개별 고조파의 성분 크기를 기반으로 직렬 리액터의 크기를 산정하는 방식으로 설계과정을 제안하였다. 또한, 제안한 방법을 기반으로 설계된 하이브리드 타입 커패시터 뱅크를 설계

통에 적용하여, 전압 보상과 전력품질 개선 효과를 검증하였다. 지속적인 부하크기의 증가와 고조파를 발생시키는 비선형 부하의 증가가 예상되는 상황에서 송전계통에서의 안정도 및 신뢰도, 전력품질 개선에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

References

- [1] T. J. E. Miller, "Reactive power control in electric systems," John Wiley & Sons, Canada 1982
- [2] P. Kundur "Power System Stability and Control," McGraw-Hill, New York, 1994
- [3] B. Gao, G. K. Morison, P. Kundur, "Voltage stability evaluation using modal analysis," IEEE Transactions on Power Systems, Vol.7, No.4, pp.1529-1542, Nov 1992
- [4] Claudia Reis, F.P. Maciel Barbosa, "A comparison of voltage stability indices," Electrotechnical Conference 2006, MELECON 2006. IEEE Mediterranean, pp. 1007-1010, May 2006, Spain
- [5] J. Arrillaga, N. R. Watson, S. Chen, "Power System Quality Assessment," Wiley, U.S.A., 2000
- [6] Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, H. Wayne Beaty, "Electrical Power Systems Quality, McGraw-Hill, U.S.A., 2002

Dong-Hee Yoon (Member)



2004 : BS degree in Electrical Engineering, Korea University.
 2011 : PhD degree in Electrical Engineering, Korea University.
 2011~2012 : Research Professor, Korea University.
 2012~Present : Assistant Professor in Department of New & Renewable Energy , Kyungil University

BIOGRAPHY

Hansang Lee (Member)



2003 : BS degree in Electrical Engineering, Korea University.
 2005 : MS degree in Electrical Engineering, Korea University.
 2010 : PhD degree in Electrical Engineering, Korea University.
 2010~2012 : Research Professor, Korea University.

2012~Present : Assistant Professor in School of Electrical & Railway Engineering, Kyungil University