

고조파 전류원에 의한 콘덴서 임피던스 특성 해석

(Analysis of Impedance Performance for Condenser by Harmonic Current Source)

김종겸* · 박영진

(Jong-Gyeum Kim · Young-Jeen Park)

Abstract

Most of the user has been used linear load and non-linear load. The former is usually inductive load which is needed power factor compensation, the latter is power conversion system device. Actually two kinds of load is used together in the customer application. Generally capacitor is used for power-factor compensation of inductive load and reduction harmonics of non linear load with reactor. Non-linear load generates harmonic current for its energy conversion process.

If harmonic current pass along the low impedance side of distribution system, the magnification of voltage and current is appeared by the series and parallel resonance. As a result, condenser has received a bitter electrical stress by the harmonic component.

In this paper, we analyzed that how resonance is changed by the 5-th harmonic current pattern and proposed an alternative plan for non-magnification.

Key Words : Harmonics, Capacitor, Power factor, Series and Parallel Resonance, Stress

1. 서 론

일반 수용가에서는 전등 및 전열부하와 같은 선형부하(Linear-load)와 컨버터 등과 같이 전력변환과정에서 고조파를 발생하는 비선형 부하(Non-linear load)가 함께 사용되는 경우가 많다[1].

수용가는 유도전동기와 같은 유도성 부하의 역률을 보상하기 위해 콘덴서를 설치하거나 비선형 부하에서 발생하는 고조파를 줄이기 위해 콘덴서에 리액터를

직렬로 연결한 수동형 필터를 사용하는 경우가 많다. 비선형 부하의 사용증가로 인해 발생하는 고조파의 영향을 줄이기 위해 여러 가지 방법을 도입하고 있다. 이와 관련하여 수용가 역률 보상설비에서도 콘덴서만 단독으로 사용하는 경우보다 고조파 성분도 함께 저감하기 위해 콘덴서에 리액터를 추가하여 사용하는 경우가 점차 증가하고 있다[2-3].

일반적으로 고조파 전류는 부하측 보다 임피던스값이 낮은 전원측에 더 큰 영향을 주고 있다.

전력공급 시스템에 고조파가 존재할 경우 역률 보상 콘덴서와 리액터 및 변압기의 리액턴스 성분에 의해 공진현상이 발생할 경우 전압 및 전류의 확대로 변압기의 경우 지나친 열을 발생하여 사용 수명 감소를 초

* 주저자 : 강릉원주대학교 전기공학과 교수
Tel : 033-760-8785, Fax : 033-760-8780
E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr
접수일자 : 2010년 11월 18일
1차심사 : 2010년 11월 24일
심사완료 : 2010년 12월 15일

래할 수 있고, 콘덴서의 경우 전압 및 전류의 확대로 절연과피에 이를 수도 있다. 따라서 각 나라별 또는 기관별로 콘덴서의 안정적인 사용을 보장하기 위해 전압, 전류 등에 따른 제 규격을 정해 운영하고 있다 [2-8].

고조파 전류는 임피던스가 낮은 쪽으로 이동하되 회로의 공진에 의해 임피던스의 최소 또는 최대와 가깝거나 일치할 경우 전압 및 전류의 확대로 기기에 매우 높은 전기적인 스트레스로 작용한다. 전기기기를 스트레스로부터 보호하기 위해서는 전압 및 전류의 확대가 발생하는 회로의 조건을 검토하여 저감할 수 있는 방안이 제시되어야 한다.

그래서 본 연구에서는 수용가 설비에서 비선형 부하의 운전시 발생하는 고조파 전류에 의해 공진이 발생한 경우를 분석하고 확대를 피하기 위한 대안을 제시하였다.

2. 공진 및 확대 현상

회로에서 공진이 발생할 경우 부하에서 전원측으로 정상적인 전류의 흐름이 바뀌고, 정상적으로 흐름에서도 시스템의 다른 부하전류와 결합하는 경우가 많다. 사용되는 부하에서 선형부하가 많은 경우 왜형된 비선형 부하는 큰 문제가 되지 않는다. 하지만 전류의 흐름이 콘덴서의 설치로 변경될 경우 왜형 레벨은 올라가서 시스템에 나쁜 영향을 주게 된다[2-4].

사용하는 회로에 흐르는 고조파 전류의 주요 영향으로는 연결된 회로 임피던스에 고조파 전압강하를 일으킨다. 회로에 연결된 리액터와 커패시터의 직렬연결에 의한 임피던스는 비선형 부하에서 발생하는 고조파 성분에 의해 어느 특정 주파수에서 직렬 공진이 발생할 경우 콘덴서에 큰 전류 스트레스로 작용할 수 있으며, 심할 경우 통신선에 장애를 줄 수도 있다.

콘덴서의 커패시턴스와 변압기 및 유도성 부하의 인덕턴스에 의한 병렬 결합은 어느 주파수 범위에서 매우 높은 임피던스를 나타내는 병렬공진을 발생시켜 유도성 및 용량성 부하 회로 각각에 매우 높은 전압 및 순환전류를 흐르게 하여 절연 고장을 발생시킬 수 있다. 고조파에 의한 과전압은 콘덴서의 정격 초과로

고장에 이르게 할 수도 있다.

콘덴서의 용량은 대개 부하에 필요한 무효전력 Q_c 로 나타낸다. 콘덴서 연결점에서의 고장 레벨이 F_L 또는 단락용량 S 일 경우 공진 차수(n_{res})는 다음과 같다.

$$n_{res} = \sqrt{\frac{F_L}{Q_c}} = \sqrt{\frac{S}{Q_c}} \quad (1)$$

만일 식 (1)의 수치가 고조파 발생 부하의 고조파 발생차수에 가까울 때 공진 위험성이 존재한다.

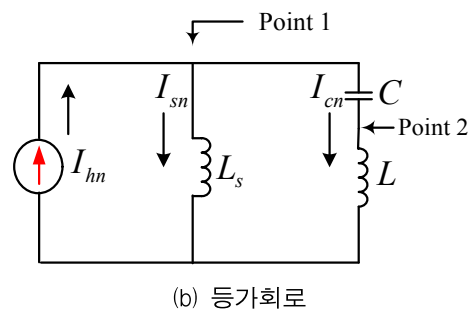
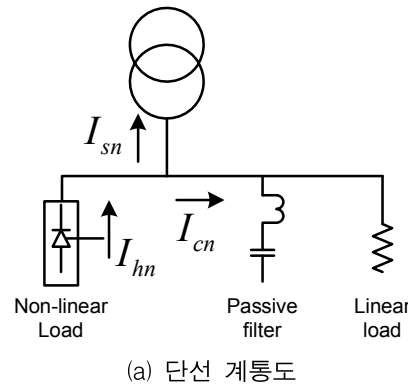


그림 1. 단선 계통도와 등가회로
Fig. 1. Single line diagram and equivalent circuit

일반적인 전력계통에 있어서 n차 고조파 전원에 대한 가장 단순한 등가회로는 그림 1과 같다. 일반 부하 시스템에서 저항부하는 고조파에 거의 상관없이, 유도성 부하의 경우 임피던스는 고조파에 대해서는 높은 값을 나타내므로 여기서는 생략하였다. 그림 1(a)에서 비선형 부하에서 발생하는 고조파 전류 I_{hn} 은 전원측(I_{sn})과 선형부하의 역률 보상과 고조파 성분을

저감하기 위한 수동형 필터(I_{cn})에도 흐르게 된다. 그림 1 (a)의 계통도를 등가회로도로 나타낼 경우 그림 1 (b)와 같다.

그림 1 (b)에서 비선형 부하의 사용으로 발생하는 고조파 전류는 변압기와 수동형 필터에 영향을 줄 수 있다. 이때 고조파에 의한 영향 분석에서 PCC(Point 1)와 수동형 필터의 리액터와 콘덴서 연결부(Point 2)가 주요한 요소이다.

표 1. 고조파 전류 분류의 기본 패턴
Table 1. Basic pattern of harmonic current

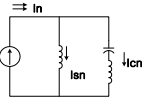
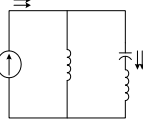
패턴	분류양상	임피던스 조건
① 비확대 회로		유도성 $nX_L - \frac{X_C}{n} > 0$
② 직렬공진 (또는 필터)		$nX_L = \frac{X_C}{n}$
확대 회로	③ 콘덴서측 확대	용량성 $-\frac{1}{2} < \frac{nX_L - \frac{X_C}{n}}{nX_s} < 0$
	④ 병렬공진	용량성 $-2 < \frac{nX_L - \frac{X_C}{n}}{nX_s} \leq -\frac{1}{2}$
	⑤ 전원측 확대	용량성 $\frac{nX_L - \frac{X_C}{n}}{nX_s} \leq -2$

그림 1과 같은 회로에서 고조파 전류원에 대한 거동(分流)은 표 1에 정리한 5가지 기본 패턴으로 분류할 수 있다[7]. 이들 중 특히 문제가 되는 것은 ②의 직렬공진과 ③~⑤의 확대회로일 때이다. LC 회로의 공진 주파수 f_{res} 는 다음과 같다[5].

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

L 또는 C 가 커지면 저주파의 공진점을 가지게 된다. 따라서 L 없이 콘덴서를 다량 설치하는 계통에서는 저차 고조파의 확대현상이 발생하고 장애를 일으킬 가능성이 높아진다.

3. 특성 해석

수용가에 설치된 비선형 부하에서 발생하는 고조파 전류성분은 회로조건에 따라 직·병렬 공진에 의해 확대되는 경우와 확대되지 않는 경우가 있다.

그림 1과 같은 회로에서 고조파 전류원에 의한 임피던스의 주파수 스캔은 PCC((a) : Point 1)와 콘덴서에 리액터를 부착한 곳((b) : Point 2) 두 곳에서 해석하였다. 해석에는 전자계과도해석 프로그램(EMTP)을 사용하였다[5].

표 1에서 직렬 공진 및 병렬 공진에 대해 5차 고조파를 기준으로 해석한 결과는 다음과 같다.

3.1 비확대 회로

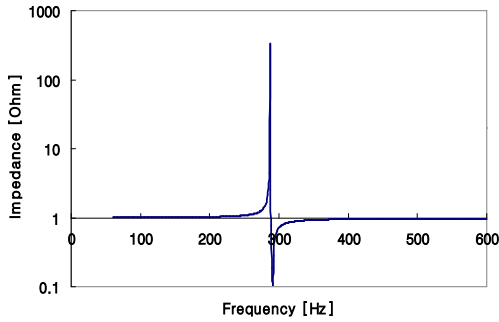
일반적으로 진상 콘덴서에 적정한 값의 리액터가 부착되어 있는 회로나 용량성 임피던스를 무시할 수 있는 회로에서는 고조파의 확대가 일어나지 않는다. 이런 경우 표 1의 첫 번째 경우에 해당되는 것으로서 임피던스 조건은 다음과 같다.

$$nX_L - \frac{X_C}{n} > 0 \quad (3)$$

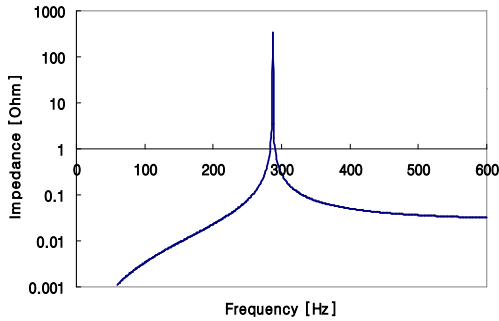
식 (3)과 같은 조건이 되도록 해석에 사용된 파라미터는 각각 $L = 20[mH]$, $C = 15[\mu F]$ 그리고 변압기의 리액턴스는 $L_s = 0.5[mH]$ 로 선정하였다. 이들 파라미터를 가지고서 포인트 1과 포인트 2에서의 주파수 변화에 따른 임피던스의 크기를 해석하였다.

그림 2 (a)에서는 그림 1 (b)의 포인트 1에 해당되는 곳에서 주파수 변화에 따른 임피던스 특성을 분석한 것으로서 287[Hz]에서 병렬공진(338.87[Ω])이 발생하고, 291[Hz]에서 직렬공진(0.10[Ω])이 발생할 수 있다. 즉 5차 고조파 성분에 대해 4.78(287[Hz])차와 4.85

(291[Hz])차에서 각각 병렬 및 직렬 공진이 발생하므로 5차 고조파에 의한 확대가 일어나지 않음을 알 수 있다.



(a) Point 1



(b) Point 2

그림 2. 비확대 회로에서 주파수 스캔
Fig. 2. Frequency scan at the non-enlargement circuit

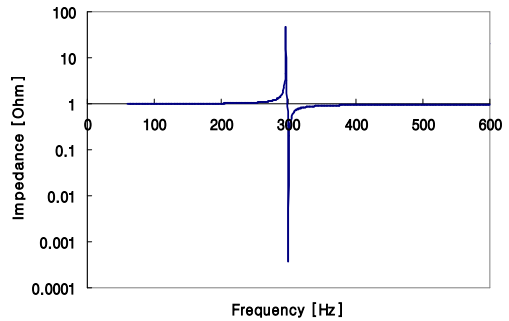
그림 2 (b)에서는 그림 1 (b)의 포인트 2에 해당되는 곳에서의 주파수 특성을 분석한 것으로서 287[Hz]에서 병렬공진(337.87[Ω])이 발생한다. 위의 경우와 같이 5차 고조파에 대해 4.78차에서 병렬공진이 일어나므로 확대가 발생하지 않게 된다. 그러나 공진이 일어나는 차수에서는 전압이나 전류의 확대가 일어날 수 있으므로 대책으로서 콘덴서 회로를 유도성으로 해 두면 콘덴서 회로와 전원 모두 확대하지 않는 가장 바람직한 조건이고, X_{L1} 을 크게 함에 따라 콘덴서 과부하 조건을 더욱 경감시킬 수 있다.

3.2 직렬공진

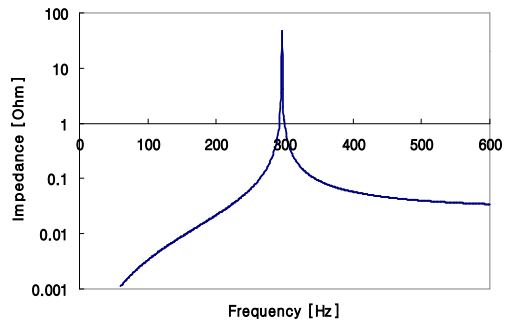
직렬공진은 특정 주파수에서 임피던스가 가장 낮아지는 현상이다. 비선형 부하에서 발생하는 고조파의 특정 차수에서 회로가 공진에 의해 임피던스가 최소로 될 경우 전류의 확대로 나쁜 결과를 낳을 수 있다. 이런 경우 표 1의 두 번째 경우에 해당되는 것으로서 임피던스에 대한 조건은 다음과 같다.

$$nX_L - \frac{X_C}{n} = 0 \quad (4)$$

식 (4)와 같은 조건이 되도록 해석에 사용된 파라미터는 각각 $L = 18.7632[mH]$, $C = 15[\mu F]$ 변압기의 리액턴스는 $L_s = 0.5[mH]$ 로 하였다. 이들 파라미터를 가지고서 포인트 1과 포인트 2에서의 주파수 변화에 따른 임피던스의 크기를 해석하였다.



(a) Point 1



(b) Point 2

그림 3. 직렬 공진 회로에서 주파수 스캔
Fig. 3. Frequency scan at the series resonance circuit

그림 3 (a)에서는 그림 1 (b)의 포인트 1에 해당하는 곳에서 주파수 특성을 분석한 것으로서 296[Hz](거의 5차)에서 병렬공진(47.63[Ω])이 발생하고, 300[Hz](5차)에서 직렬공진(0.0[Ω])이 발생할 수 있다. 그림 3 (b)에서는 그림 1 (b)의 포인트 2에 해당되는 곳에서의 주파수 특성을 분석한 것으로서 296[Hz](거의 5차)에서 병렬공진(46.63[Ω])이 발생한다. 5차 전류 고조파 성분에 의해 포인트 1과 2 모두 5차 또는 5차에 매우 가까운 곳에서 직렬 및 병렬공진이 발생하여 전압 및 전류에 의한 스트레스가 가장 높아짐을 알 수 있다. 그림 3과 같이 고조파에 의한 영향을 저감하기 위해 콘덴서와 리액터를 필터로서 동작시킬 경우 공진에 의한 스트레스를 많이 받아 고장이 빨라질 수 있으므로 콘덴서와 리액터의 경우 전압 및 전류 내량을 더욱 높일 필요가 있다.

3.3 콘덴서측 확대회로

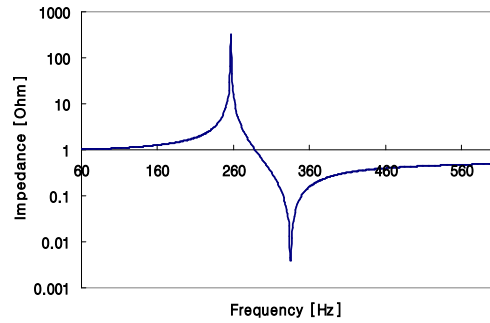
다음은 고조파에 의해 콘덴서측이 확대되는 경우이다. 이런 경우 표 1의 세 번째 경우에 해당되는 것으로서 임피던스 조건은 다음과 같이 용량성이다.

$$-\frac{1}{2} < \frac{nX_L - \frac{X_C}{n}}{nX_s} < 0 \quad (5)$$

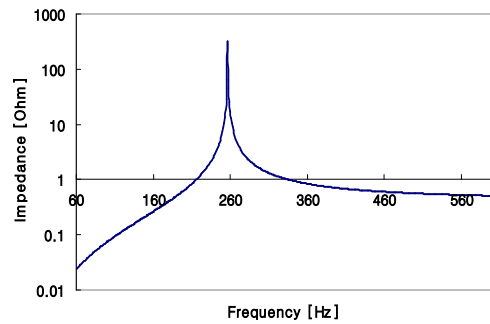
식 (5)와 같은 조건이 되도록 해석에 사용된 파라미터는 각각 $L = 15.0[mH]$, $C = 15[\mu F]$ 그리고 변압기의 리액턴스는 앞서와 달리 높은 $L_s = 10.6[mH]$ 로 정하였다. 이들 파라미터를 가지고서 포인트 1과 포인트 2에서의 주파수 변화에 따른 임피던스의 크기를 해석하였다.

그림 4 (a)에서는 그림 1 (b)의 포인트 1에 해당하는 곳에서 주파수 특성을 분석결과 257[Hz](4.283차)에서 병렬공진(321.93[Ω])이 발생하고, 336[Hz](5.6차)에서 직렬공진(0.004[Ω])이 발생할 수 있다. 5차 고조파에 대해 병렬공진은 발생고조파의 영역을 약간 벗어나서 큰 문제가 없지만, 병렬공진의 경우 임피던스가 비확대에 비해 매우 높아 전압에 의한 스트레스 정도가 매

우 높아져 콘덴서의 경우 내량을 초과할 수 있으므로 반드시 피해야 한다.



(a) Point 1



(b) Point 2

그림 4. 콘덴서측 확대 회로에서 주파수 스캔
Fig. 4. Frequency scan at the condenser side enlargement circuit

그림 4 (b)에서는 그림 1 (b)의 포인트 2에 해당되는 곳에서의 주파수 특성을 분석한 것으로서 257 [Hz](4.283차)에서 병렬공진(322.93[Ω])이 발생한다. 이때에도 5차 고조파의 범위를 벗어난 주파수 영역에서 병렬공진에 의해 콘덴서의 경우 전류가 확대되어 스트레스로 작용하게 되므로 콘덴서의 내량을 높일 필요가 있다.

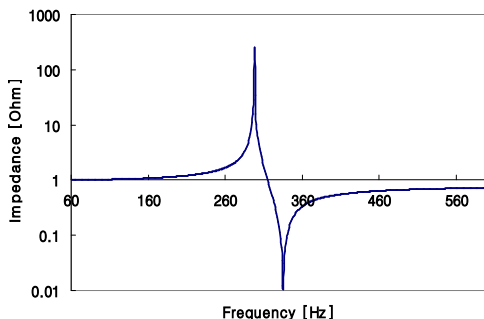
3.4 병렬공진 회로

고조파 전류 성분에 의해 전원측과 콘덴서측에 거의 같은 크기로 영향을 받는 경우에 대한 회로 운전조건으로서 이런 경우 표 1의 네 번째에 해당되는 경우로

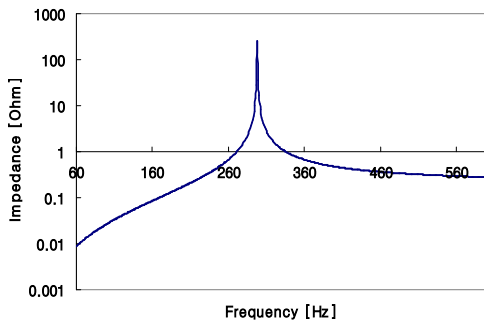
임피던스 조건은 다음과 같이 용량성이다.

$$-2 < \frac{nX_L - \frac{X_C}{n}}{nX_s} \leq -\frac{1}{2} \quad (6)$$

식 (6)과 같은 조건이 되도록 해석에 사용된 파라미터는 각각 $L = 15.0[mH]$, $C = 15[\mu F]$ 이고, 변압기의 리액턴스는 $L_s = 4.0[mH]$ 이다. 이들 파라미터를 가지고서 포인트 1과 포인트 2에서의 주파수 변화에 따른 임피던스의 크기를 해석하였다.



(a) Point 1



(b) Point 2

그림 5. 병렬공진 회로에서 주파수 스캔
Fig. 5. Frequency scan at the parallel resonance circuit

그림 5 (a)에서는 그림 1 (b)의 포인트 1에 해당하는 곳에서 주파수 특성을 분석한 것으로서 298[Hz] (거의 5차)에서 병렬공진(251.86[Ω])이 발생하고, 336[Hz](5.6차)에서 직렬공진(0.04[Ω])이 발생할 수

있다. 5차 고조파에 의해 포인트 1에서 병렬공진이 발생할 경우 가장 높은 임피던스에서 가장 높은 전압 스트레스가 발생하게 된다. 또한 그림 5 (b)에서는 그림 1 (b)의 포인트 2에 해당되는 곳에서의 주파수 특성을 분석한 것으로서 298[Hz](거의 5차)에서 병렬공진(251.86[Ω])이 발생할 경우 위와 마찬가지로 콘덴서측에 가장 높은 전압 스트레스로 작용하여 콘덴서를 신속하게 손상시킬 수 있으므로 절대 허용해서는 안 되는 운전 조건이다. 따라서 이로부터 콘덴서를 보호하기 위해서는 전압 및 전류 정격을 더욱 높일 필요가 있다.

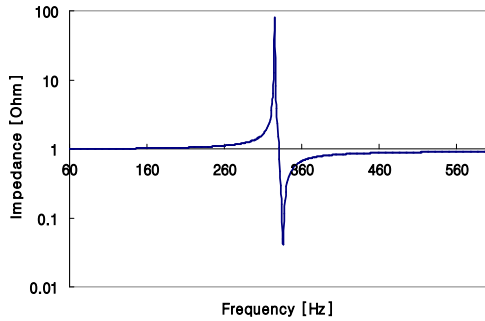
3.5 전원측 확대회로

고조파 전류가 콘덴서측보다는 전원측에 더 많이 흐를 경우에 대한 것으로서 이런 경우 표 1의 다섯 번째에 해당되는 경우로 임피던스 조건은 다음과 같다.

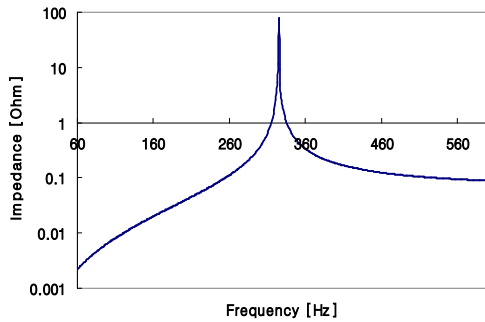
$$\frac{nX_L - \frac{X_C}{n}}{nX_s} \leq -2 \quad (7)$$

식 (7)과 같은 조건이 되도록 해석에 사용된 파라미터는 각각 $L = 15.0[mH]$, $C = 15[\mu F]$ 그리고 변압기의 리액턴스는 $L_s = 1.0[mH]$ 로 정하였다. 이들 파라미터를 가지고서 포인트 1과 포인트 2에서의 주파수 변화에 따른 임피던스의 크기를 해석하였다.

그림 6 (a)에서는 그림 1 (b)의 포인트 1에 해당하는 곳에서 주파수 특성을 분석한 것으로서 325[Hz](5.4차)에서 병렬공진(80.86[Ω])이 발생하고, 336[Hz](5.6차)에서 직렬공진(0.01[Ω])이 발생할 수 있다. 그림 6 (b)에서는 그림 1 (b)의 포인트 2에 해당되는 곳에서의 주파수 특성을 분석한 것으로서 325[Hz](5.4차)에서 병렬공진(80.40[Ω])이 발생한다. 이런 경우 전원측 전류가 확대될 수 있고, 전원 모선의 전압 왜형이 증대할 수 있어 가능한 피하는 게 가장 바람직하지만, 임피던스 값이 부하에 따라 변동할 가능성이 높으므로 콘덴서와 리액터의 경우 전압 및 전류 내량을 높일 필요가 있다.



(a) Point 1



(b) Point 2

그림 6. 전원측 확대 회로에서 주파수 스캔
Fig. 6. Frequency scan at the source side enlargement circuit

위의 5가지 계산결과에서 전원측(I_{sn}) 및 콘덴서(I_{cn})에 유입되는 고조파 분류는 각각 다음과 같이 계산할 수 있다. 식 (8) 및 (9)에서와 같이 분모를 증가시킬 경우 전원측 및 콘덴서 측에 고조파 전류를 줄일 수 있다.

$$I_{sn} = I_{hn} \times \frac{nX_L - \frac{X_c}{n}}{nX_s + \left(nX_L - \frac{X_c}{n}\right)} \quad (8)$$

$$I_{cn} = I_{hn} \times \frac{nX_o}{nX_s + \left(nX_L - \frac{X_c}{n}\right)} \quad (9)$$

위 식에서 콘덴서가 부착된 회로의 임피던스 $\left(nX_L - \frac{X_c}{n}\right)$ 가 용량성이 되면 전원 또는 콘덴서 회로

에는 발생 고조파 전류 I_{hn} 보다 큰 고조파 전류가 유입된다. 이것을 고조파 확대현상이라고 한다. 이 현상은 보통 전원측으로의 고조파 전류 확대 또는 콘덴서 회로에 확대되어 나타나지만, 특히 전원측과 콘덴서 회로 임피던스가 공진 조건이 성립하면 작은 고조파 전류라도 크게 확대되어 문제를 일으키게 된다. 따라서 고조파 전류에 의한 파형의 왜형 증대나 콘덴서 설비의 과부하를 방지하기 위해서는 발생 고조파에 대하여 콘덴서가 부착된 회로의 임피던스를 유도성으로 할 경우 고조파에 의한 영향을 줄일 수 있다.

4. 결 론

에너지를 효율적으로 사용하기 위해 콘덴서를 설치하여 무효전력을 보상하거나 비선형 부하에서 발생하는 고조파를 줄이기 위해 콘덴서를 사용한 필터를 적용하는 경우가 많다.

고조파 전류는 임피던스가 낮은 쪽으로 흐르는데 콘덴서의 경우 주파수가 높아짐에 따라 임피던스가 낮아지기 때문에 고조파를 흡수하는 역할을 하게 된다. 고조파원이 존재할 경우 회로의 리액턴스와 콘덴서의 커패시턴스 성분에 의해 직렬공진 또는 병렬공진으로 전압 및 전류가 확대될 수 있다.

본 연구에서는 선형 및 비선형 부하가 함께 사용되는 설비에서 고조파 전류에 의해 그 영향이 확대되는 경우와 확대되지 않는 경우에 대한 해석 결과 공진에 의해 전압이나 전류가 확대되어 전원측 및 부하측 특히 콘덴서에 큰 영향을 미칠 수 있는 조건을 해석하였으며, 각각 해석에서 그 영향을 줄이기 위해 적절한 파라미터를 선정하여 저감방안을 제시하였다.

이 논문은 한국조명·전기설비학회 2010년도 추계학술대회(2010. 9. 29, COEX)에서 발표하고 우수추천논문으로 선정된 논문임.

References

- [1] 김종겸 외 2인, “선형 및 비선형 부하량에 따른 고조파 성분의 변화”, 대한전기학회 논문지, Vol.51, No.8,

- pp.441-448, 2002.8.
- [2] Ramasamy Natarajan, "Power System Capacitors", Taylor & Francis, 2005.
 - [3] 김종겸외 2인, "불평형 전압 동작시 전력 콘덴서 특성 분석", 조명전기설비학회 논문지, Vol.22, No.5, pp.64-72, 2008. 05.
 - [4] Thomas M. Blooming, "Capacitor Application Issues", IEEE Trans on IAS, Jul-Aug, pp.1013-1026, 2008.
 - [5] H.W. Dommel, "Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP Theory Book)", BPA 1986.
 - [6] IEEE Std 18-2002, "IEEE Std For Shunt Power Capacitors".
 - [7] 일본 전기학회 기술보고서 제 581호, "工場・빌딩에 있어 電源品質 確保 現狀과 對策", 1996년.
 - [8] 지식경제부, "전기품질 변동에 따른 콘덴서의 전기적 스트레스 해석 및 저감 방안 연구", 2009.

◇ 저자소개 ◇



김종겸(金宗謙)

1961년 10월 3일생. 1984년 동아대학교 전기공학과 졸업. 1996년 충남대 공대 전기공학과 졸업(박사). 1987~1988년 한국통신공사 근무. 1988~1996년 한국수자원공사(K-Water) 근무. 1996년~현재 국립강릉원주대학교 전기공학과 교수. 대한전기학회 평의원. 전기기기 및 에너지변환시스템 부문 편집위원장. 본 학회 학술이사.

Tel : (033)760-8785

E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr



박영진(朴永鎭)

1959년 11월 19일생. 1982년 단국대학교 전기공학과 졸업. 1996년 단국대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년~현재 강릉원주대학교 전기공학과 교수.

Tel : (033) 760-8784

E-mail : popspark@gwnu.ac.kr