

Abstract

This paper describes digital simulation of harmonic elimination in the FC-TCR. (Fixed Capacitor and Thyristor Controlled Reactor)

A model at harmonic frequency is developed for a STATIC VAR compensator. The model is shown to be useful in predicting resonance condition. A new variable filter is used for synthesized harmonic elimination.

I. 서론

무효전력 보상장치로서 정지형 보상장치 (STATIC VAR compensator)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그들중 FC-TCR (Fixed capacitor in parallel with a thyristor controlled reactor)은 리액터와 커패시터를 병렬로 연결시킨 장치로, 리액터량이 신속하고 연속적인 스위치 동작으로 조절되므로 무효전력제어가 우수하다. [1][2]

그러나 이 장치는 Thyristor스위치 동작에 의해 고조파가 발생하는 단점이 있다.

이 장치에서 발생하는 고조파는 FC-TCR장치의 커패시터의 과열 및 리액터의 소손등 기기에 악영향을 미치며, 배전단의 전압, 전류 파형의 왜곡으로 인한 보호계전기(누전차단기, 역상검출계전기)의 오동작, 위상 제어 장치의 제어 불안정, 라디오 및 데이터 전송 회선에 유도 장애를 일으킨다.

현재까지 연구된 필터는 고정필터를 사용하므로 전력계통에서 발생하는 고조파를 연속적으로 제거하는 데는 많은 어려움이 있다. [3]

그러므로 본 논문에서는 Thyristor스위치에서 발생하는 고조파를 가변필터를 사용하여 연속적으로 제거하게 된다.

II. FC-TCR 회로

전력계통의 순시전압을 E_s 라 하고, 계통 임피던스는 저항분을 무시하고, 계통리액턴스만을 고려하여 L_s 라 가정한다. 이때 각 전류는 다음과 같다. (단, $H(t)$ 는 Thyristor의 switching on 시간을 나타내는 함수로서, Turn on 시에는 단위 값 1을 가지며 Turn off시에는 0 값을 갖는다. 또한 I_s, I_r, I_c 는 순시치 이다.)

$$\begin{aligned} I_s &= 1/L_s \int (E_s - V_c) dt \\ I_r &= (1/L_r) \int (V_c H(t)) dt \\ I_c &= C dV_c/dt \end{aligned} \quad \text{----- (1)}$$

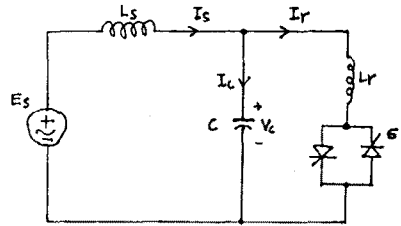


그림 1. 계통에 적용된 FC-TCR

FC-TCR장치에서 I_c 는 커패시터에 흐르는 전류이고, I_r 은 리액터에 흐르는 전류이다.

전류 I_s 는 다음과 같다.

$$I_s = I_r + I_c \quad \text{----- (2)}$$

첫식을 미분방정식으로 표현하면, 다음과 같다.

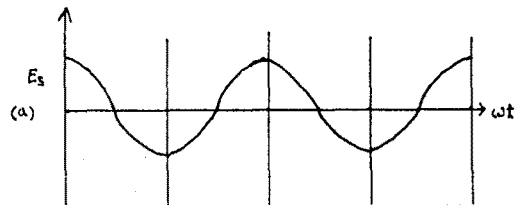
$$\begin{aligned} dV_c/dt^2 + (1/(C \cdot L_s) + H(t)/(C \cdot L_r))V_c \\ = E_s/CL_s \end{aligned} \quad \text{--- (3)}$$

$$dI_r/dt = (1/L_r)H(t)V_c$$

계통이 무한히 stiff한 ac계통이라면, 계통 임피던스는 0 에 접근한다. 그러므로 식 (3) 에 CL_s 를 급하고 L_s 를 0 로 놓으면, 다음과 같이 된다.

$$V_c = E_s \quad \text{----- (4)}$$

아래에 있는 그림 2.는 전력계통에 FC-TCR 이 적용 되었을때, 단상의 정현파전압 E_s 에 대한 FC-TCR 장치의 리액터에 걸리는 전압과 리액터 전류의 파형을 나타낸다.



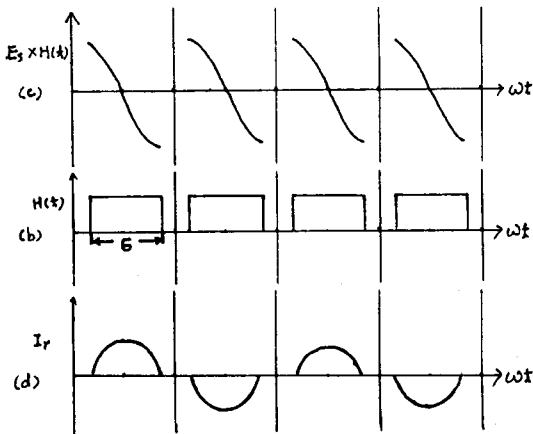


그림 2. TCR의 전압과 전류 파형

- (a) 계통전압 파형
- (b) Thyristor의 switching on 시간을 나타내는 함수 H(t)
- (c) 리액터에 걸리는 전압
- (d) 리액터에 흐르는 전류

그림 2의 (a)는 단상의 정현파 전압 E_s 가 입력됨을 의미하고, (b)는 Thyristor의 스위치 동작에 의해 σ 만큼 도통한다. 전압과 $H(t)$ 의 곱은 리액터에 걸리는 전압을 의미하고, I_r 은 리액터에 흐르는 전류류를 의미한다. Thyristor의 switching on 시간을 푸리에 급수를 이용하여 $H(t)$ 로 표시하면, 다음과 같다.

$$H(t) = \sigma / \pi + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2/n\pi}{\sin(n\sigma)} \cos(n\pi) \sin(n\sigma) \cos(2n\omega t) \quad \text{----- (5)}$$

만일 입력전압이 E_s 를

$$E_s = e_s \cos \omega t \quad \text{----- (6)}$$

라 가정하면, 전류 I_r 은 다음과 같다.

$$I_r = e_s / \omega L r \pi \left[\sigma \sin(\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n\pi) \sin(n\sigma)}{n[\sin(2n-1)\omega t / (2n-1) + \sin(2n+1)\omega t / (2n+1)]} \right] \quad \text{--- (7)}$$

여기서, h 번째 고조파는 다음과 같다.

$$I_h = 2e_s / h\omega L r \pi \left[\frac{\cos((h+1)\sigma/2)}{\sin((h+1)\sigma/2)} / (h+1) + \frac{\cos((h-1)\pi/2)}{\sin((h-1)\sigma/2)} / (h-1) \right] \sin(h\omega t) \quad \text{--- (8)}$$

Harmonic current versus Sigma

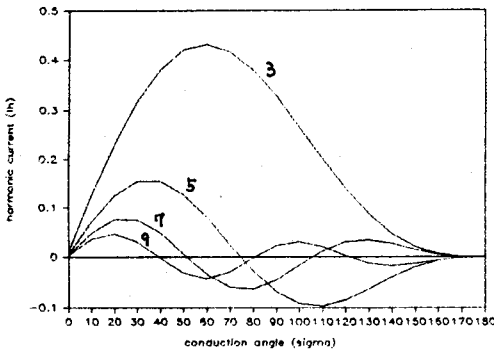


그림 3. 전도각에 대한 기본파 전류와 고조파 전류의 비

계통 전압이나 리액턴스를 단위값으로 나타내고, 전도각에 대한 기본파 전류와 고조파의 비를 표시한 것이다.

III. 고조파 보상회로의 설계

FC-TCR 장치의 Thyristor switching 동작에서 발생하는 고조파를 제거하기 위하여 Filter를 장치한다.

우선 FC-TCR 장치에서 발생하는 고조파의 어드미턴스를 분석한다.

FC-TCR 장치에서 분석한 고조파의 어드미턴스와 필터의 어드미턴스가 공진을 이루도록 필터의 용량과 전도각 σ' 를 결정한다.

III-1. FC-TCR 장치에서 발생하는 고조파분석

앞에서 계통전압을 $E_s = e_s \cos \omega t$ 라 가정하였을 때의 고조파 성분은 식(8)에 나타나 있다.

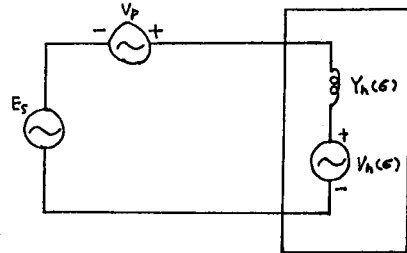


그림 4. FC-TCR의 고조파 어드미턴스 분석 회로

발생된 고조파의 어드미턴스를 평가하기 위해 그림 4와 같이 아래와 같은 동요전압 V_p 를 가한다.

$$V_p = V_p \cos k(\omega t + \varphi) \quad \text{----- (9)}$$

이 동요전압에 의한 전류 I_p 는 다음과 같다.

$$I_p = \int 1/Lr H V_p \cos k(\omega t + \varphi) dt \quad \text{----- (10)}$$

식(10)의 적분성분을 정리하면, 다음과 같다.

$$I_p = V_p / \omega L r \pi \left[\frac{\sigma}{k} \{ \sin k(\omega t + \varphi) - \sin(k\varphi) \} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n\pi) \sin(n\sigma)}{n} \left\{ \frac{\sin((2n-k)\omega t + k\varphi)}{(2n-k)} + \frac{\sin((2n+k)\omega t + k\varphi) - \sin(k\varphi)}{(2n+k)} \right\} \right] \quad \text{--- (11)}$$

등가 어드미턴스를 찾기 위해 k 번째 고조파를 분리하면, 다음과 같다.

$$I_k = V_p / k\omega L r \pi \left[\frac{\sigma \sin k(\omega t + \varphi) + \cos(k\pi) \sin(k\sigma)}{\sin(k\sigma)} \right] \sin k(\omega t - \varphi) \quad \text{----- (12)}$$

k 번째 고조파의 어드미턴스는 다음과 같다.

$$\bar{Y}_k = \bar{I}_k / \bar{V}_p \quad \text{----- (13)}$$

여기서 \bar{Y}_k 를 구하면, 다음과 같다.

$$\bar{Y}_k = 1 / k\omega L r \pi \left[\frac{-\cos(k\pi) \sin(k\sigma) \sin(2k\varphi) / k}{-j\{\sigma + \cos(k\pi) \sin(k\sigma) \cos(2k\varphi) / k\}} \right] \quad \text{--- (14)}$$

어드미턴스 \bar{Y}_k 는 전압의 전도각 σ 의 함수이며, σ 가 변화됨으로써 \bar{Y}_k 도 변화된다는 것을 의미한다. 동요전압이 계통전압과 위상이 같다면, 어드미턴스는 유도성만을 가진다. 유도성만을 고려하면 ($\varphi = 0$), 다음과 같다.

$$\bar{Y}_k = -j [(\sigma + \cos(k\alpha)\sin(k\sigma)/k)/k\omega L_r] \quad \text{---(15)}$$

그러나 전력계통의 고조파는 기수만 존재하므로, $\cos(k\alpha) = -1$ 이다.

III-2. Filter의 용량 및 전도각 (σ') 결정

앞에서 구한 고조파 어드미턴스와 Filter의 어드미턴스가 공진이 되도록 filter의 전도각 (σ')와 용량을 결정한다. 분석에 의한 고조파 성분과 설치될 Filter를 그림 5와 같이 나타낸다.

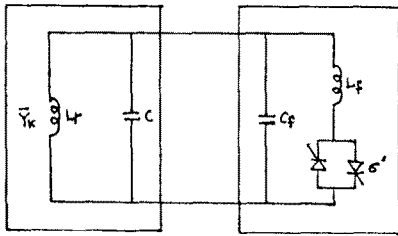


그림 5. 분석에 의한 고조파 LC 성분과 필터의 LC 회로

그림 5의 왼쪽은 Thyristor 스위치 동작에서 발생한 고조파의 어드미턴스 \bar{Y}_k 와 고정된 커패시터 C를 나타내고, 오른쪽은 고조파를 보상하기 위한 필터의 커패시터 C_f 와 리액터 L_f 를 나타낸다.

FC-TCR 장치에서의 동요전압이론을 필터에 적용하면, 필터의 어드미턴스 \bar{Y}_f 는 다음과 같다.

$$\bar{Y}_f = -j[(\sigma' - \sin(k\sigma')/k)/k\omega L_f] \quad \text{---(16)}$$

식 (16)을 적용하면 그림 6과 같다.

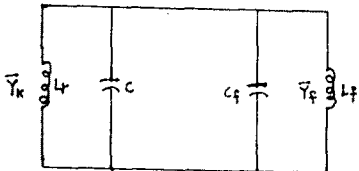


그림 6. 고조파 보상회로

일반적인 회로의 공진 조건은 다음과 같다.

$$\omega L = 1/\omega C \quad \text{---(17)}$$

즉 분석에 의한 고조파의 LC 성분과 필터 LC 회로 사이의 공진조건식은 다음과 같다.

$$\omega C + \omega C_f = [(\sigma - \sin(k\sigma)/k)/k\omega L_r] + (\sigma' - \sin(k\sigma')/k)/k\omega L_f \quad \text{---(18)}$$

첫식에서 전도각 σ 와 σ' 는 변수이다. 그러나 무효전력을 보상하기 위해 σ 값이 결정되면, Thyristor에서 발생하는 고조파를 제거하기 위한 LC 용량을 결정할 수 있고, 아울러 필터의 전도각 σ' 도 계산할 수 있다.

IV. 컴퓨터 시뮬레이션

고조파 제거 방법

1. Ir 결정 (σ 결정)
2. 고조파 성분의 어드미턴스 \bar{Y}_k 계산
3. 필터 용량 결정
4. 필터 전도각 σ' 결정

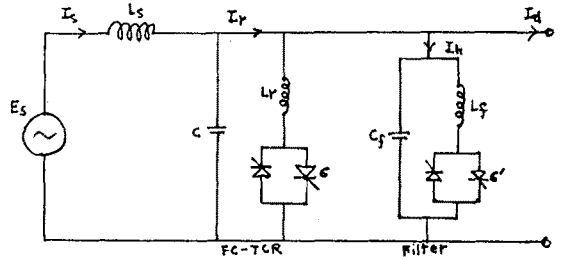


그림 7. 전력계통에 FC-TCR과 FILTER를 설치한 모델

Is : 계통전류 Ir : 고조파가 포함된 전류
Ia : Filter에 의해 고조파가 제거된 전류
Ih : 고조파 전류

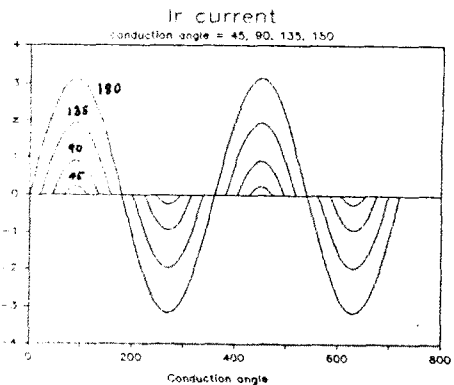


그림 8. FC-TCR의 전도각에 따른 리액터 전류 I_r 의 비교. (전도각은 각각 45°, 90°, 135°, 180°이다.)

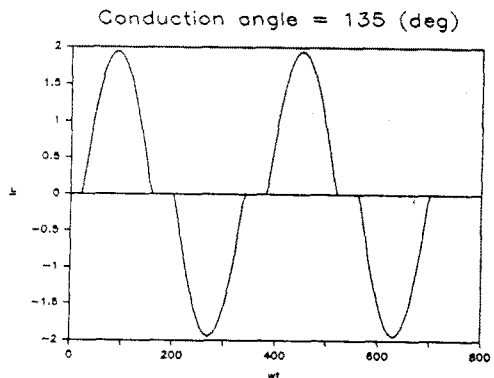


그림 9. FC-TCR의 전도각 σ 가 135°일때, 리액터 전류 I_r 을 나타낸다.

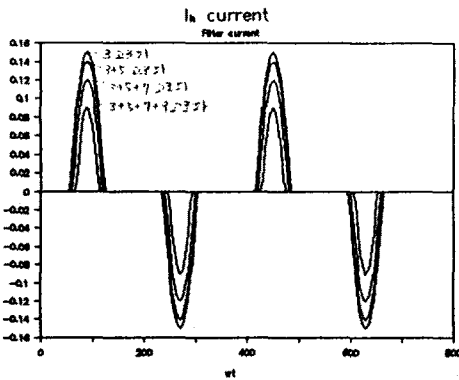


그림 10. 전도각이 135° 일때, I_r 에 포함된 고조파 전류 I_h 중 각각 3 고조파, 3 + 5 고조파, 3 + 5 + 7 고조파, 3 + 5 + 7 + 9 고조파를 제거하기 위한 FILTER의 전류를 나타낸다.

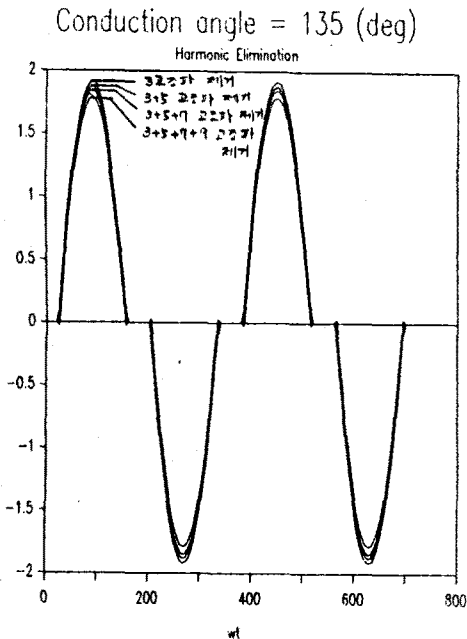


그림 11. FILTER의 전도각을 일정하여 각각 3 고조파, 3 + 5 고조파, 3 + 5 + 7 고조파를 제거했을때의 리액터 전류 I_d 의 변화를 나타낸다.

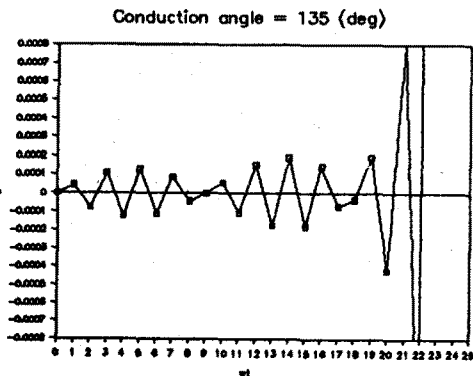


그림 12. I_r 전류에 포함된 고조파 전류 성분을 나타낸다.

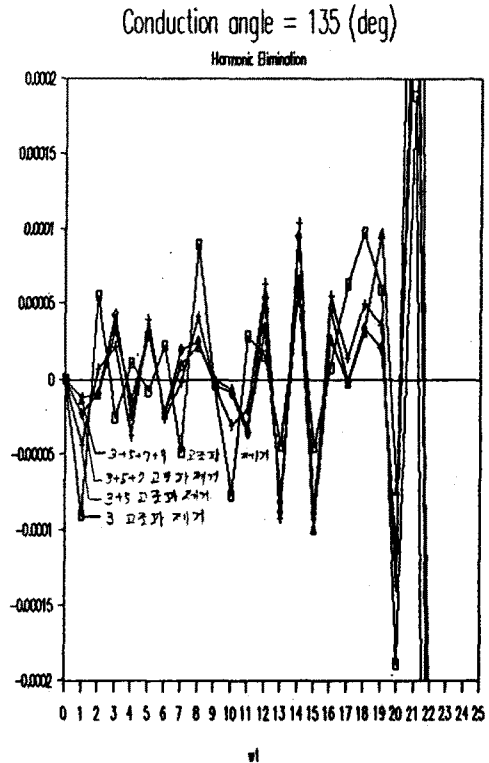


그림 13. I_h 전류에서 각각 3 고조파, 3+5 고조파, 3+5+7 고조파, 3+5+7+9 고조파가 제거됨에 따라 I_r 전류의 고조파 성분이 감소됨을 나타낸다.

V. 결 론

본 논문에서는 FC-TCR의 Thyristor 스위치 동작에서 발생하는 고조파의 합성 어드미턴스를 구하고, 가변필터를 사용하여 합성된 고조파를 동시에 제거하였다. 이 필터는 고조파 성분이 변하더라도 연속적인 제거가 가능하므로 부하단에서는 일정전압과 거의 정현파에 가까운 전류를 공급받을 수 있다. 정현파에 가까운 전류를 공급받으면, 전력계통에서 발생하는 불연속적인 고조파도 가변필터로 제거되리라 기대한다.

VI. 참고 문헌

- [1] L.J.Bohmann, R.H. Lasseter "Equivalent circuit for frequency responses of a STATIC VAR compensator" IEEE Trans. on power systems, Vol.PWRS-1.No.4,november 1986.
- [2] R.H.Lasster, S.Y.Lee "Digital simulation of STATIC VAR system transients" IEEE Trans. on power systems, Vol. PAS-101, No.10 octeter 1982.
- [3] JOHN WILEY & SONS, POWER SYSTEM HARMONICS 1985.
- [4] G.Addis J.J.Vithayathil "HVDC-AC harmonic interaction" IEEE Trans.on power Apparatus, Vol. Pas-101 No.3 march 1982.
- [5] A.Ametani "Harmonic reduction in thyristor convertors by harmonic current injection" IEEE Trans. on power systems, Vol. PAS-95 No.2 march/april 1976.