

SVC를 이용한 Highly varying 부하 영향 보상 방안 개발

정문구 조운성 장길수
고려대학교 전기전자전파공학부

Compensation of Highly Varying Load Effects Using SVCs

Moon-Goo Jung, Yunsung Cho and Gilsoo Jang
School of EE, Korea Univ.

Abstract - This work deals with the compensation of the impact of highly varying loads on the power system using a static var compensator(SVC). Highly varying loads is properly modelled via deterministic approach using PSCAD/EMTDC. Also, the procedure to determine a suitable capacity of the compensator is proposed. Finally, the new online index to quantify the harmonic distortion is introduced.

1. 서 론

미국과 같은 선진국에서는 IEEE-519와 IEC-555 규정에 의해 전력품질(power quality)을 엄격히 규제하는 등 전력의 품질 문제가 전 세계적인 관심을 일으키고 있다. 대부분의 전력회사들은 이미 수십 년 전부터 전력품질 향상을 위한 노력을 기울여 왔지만 산업의 발달로 공급 전압 품질에 민감한 부하의 비중이 커져가면서 양질의 전력을 신뢰성 있게 공급하는 문제가 더욱 어렵고 중요한 전력회사의 책무가 되었다. 또한 국내에서도 전력품질에 관한 규제와 함께 차등요금제가 시행될 것으로 예상되고 전력산업의 구조개편 시에는 고객이 배전회사를 선택하는데 있어서 전력품질은 중요한 선택 기준이 될 것이므로 전력품질 저하 원인과 대책에 관한 연구가 요구된다.

현재 많이 사용되는 전력전자기기, 컴퓨터를 비롯한 많은 부하들의 동특성은 공급 전압의 품질에 민감한 동시에 전력의 품질을 저하시키는 역할을 하고 있다. 특히 대규모의 전력을 사용하며 전력 수요가 일정하지 않고 변동하는 제철소의 전기아크로(electric arc furnace) 같은 highly varying 부하는 전압 플리커(voltage flicker) 등 전력품질을 저하시키는 현상을 일으킨다. 따라서, 전력품질을 향상시키기 위한 전력계통의 계획과 운용에 있어서 이러한 highly varying 부하들의 비선형적인 전압-전류 특성을 해석하고 모델링하는 것이 우선 되어야 하고 highly varying 부하에 의한 전력품질 저하현상을

막기 위한 대책 수립이 필요하다. 최근 전력전자기술의 발달로 빠른 스위칭 시간을 가진 보상설비인 배전용 FACTS (Flexible AC Transmission System)가 전력품질 문제의 해결을 위해 계통에 투입되고 있다. 특정 전력품질 저하현상에 대한 배전용 FACTS의 투입 효과를 분석하여 투입 계획을 세우고, 기 설치된 설비의 운용방안의 수립을 위해서는 시뮬레이션 모델의 개발이 필수적이다.

Highly varying 부하가 전력 계통에 미치는 영향을 보상할 수 있는 배전용 FACTS 기기로서 SVC를 선정하였다. Highly varying 부하 모델과 SVC 모델은 PSCAD/EMTDC로 구현되었다. 또한, 기존 고조파 정량화 지수의 문제점을 보완한 새로운 전력품질 지수를 제안하였고, 궁극적으로 구현되어야 할 전력품질 온라인 감시를 위해 개발된 지수의 적용 방안도 제시하였다.

2. 본 론

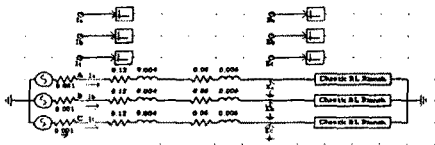
2.1 Highly varying 부하 모델

Highly varying 부하는 단순한 Ohm's law를 따르지 않는 성분을 포함하는 불규칙적인 부하 전류를 갖는 부하를 말한다. 즉, 이것은 비선형 프로세스의 결과이고, 비정현파로 나타난다.

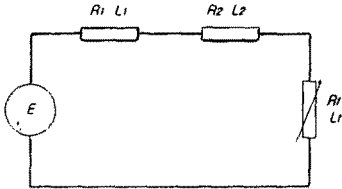
2.1.1 가정

- 본 연구에서 제시된 부하 모델은 전기로와 같이 혼잡 특성을 나타내는 부하에 적용되어 질 수 있다[1].
- 부하전류의 일정하지 않은 변동으로 시간영역과 주파수 영역에서 예측은 실측 데이터와 다를 수 있다.
- 부하를 가변 임피던스 또는 가변 어드미턴스 모델로 보고, 그 부하 임피던스 또는 어드미턴스는 혼잡 특성을 지닌다. 임피던스는 저항과 인덕턴스로 구성되도록 하였다.

2.1.2 접근법



그림(2-1-1) PSCAD/EMTDC DRAFT



그림(2-1-2) 단상 등가 회로도

PSCAD/EMTDC 모델로 그림(2-1)의 DRAFT에 보이는 바와 같이 부하단에 있는 "Chaotic RL branch"라는 PSCAD/EMTDC custom component를 개발하였다[2].

그림(2-1-1)을 단상으로 표현하면 그림(2-1-2)와 같이 다시 그려볼 수 있다. 부하의 가변 임피던스는 R_f, L_f 이다.

가. Lorenz 모델

Lorenz 시스템은 날씨를 예측하는데 일반적으로 사용되어지는 것으로 다음과 같은 미분방정식에 기반한다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \sigma(y-x) \\ \dot{y} &= rx - y - xz \\ \dot{z} &= xy - bz \end{aligned} \quad (2-1)$$

여기서, σ 는 10, r 은 28, b 는 $8/3$ 이다. Lorenz 시스템으로부터 형성된 변수들 중 하나의 변수를 취하여 R_f 를 만든다.

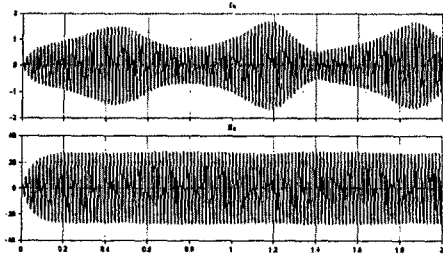
$$R_f = k_1 x \quad (2-2)$$

여기서, k_1 은 상수이다. 부하의 L_f 는 원래는 R_f 에 따라 가변적으로 변하여야 하지만 그 기여 정도가 적은 편이라 보고 R_f 와 L_f 의 비는 일정하다고 가정한다.

$$L_f = \frac{aR_f}{2\pi f} \quad (2-3)$$

여기서, a 는 상수이다. 모의에서는 0.1을 사용하였다.

Lorenz system만으로 형성된 혼잡 요소를 포함하는 가미된 부하전류는 그림(2-1-3)과 같이 모의되었다.



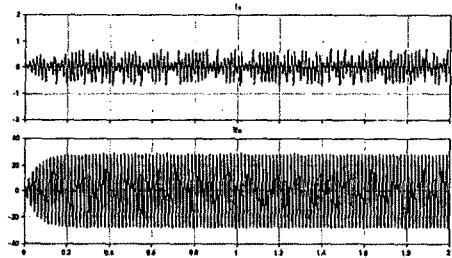
그림(2-1-3) Lorenz 모델의 전류-전압

나. Logistic 모델

Logistic 모델은 고주파 영역에서의 변동을 반영하기 위하여 추가되었고, 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$x_{n+1} = k \cdot x_n(1-x_n), \quad x_0 \in [0,1] \quad (2-4)$$

여기서, k 는 적절한 값으로 선택되어진다. 그림(2-1-4)는 Logistic 모델만으로 형성된 부하전류를 보여주고 있다.



그림(2-1-4) Logistic 모델의 전류-전압

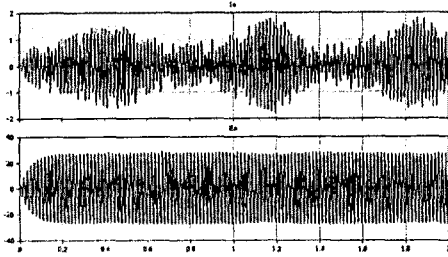
다. Mixed 모델

Lorenz 모델은 부하전류의 저주파 영역에서의 변동을 반영하고 Logistic 모델은 부하전류의 고주파 영역에서의 변동을 반영한다. 따라서, 이 두 모델의 조합은 넓은 주파수 영역에서의 특성을 나타낼 수 있다.

$$Y_f = Y_0 + c_1 Y_1 + c_2 Y_2 \quad (2-5)$$

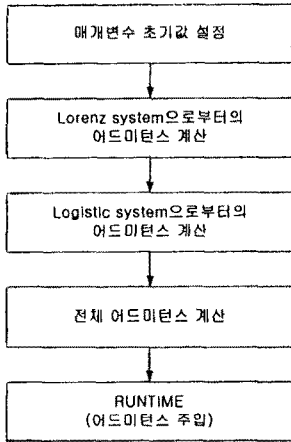
Y_0 는 고정된 어드미턴스 값이고, 부하의 총 어드미턴스는 Y_f 이다. Lorenz 모델로부터 나온 어드미턴스는 Y_1 이고, Logistic 모델로부터 나온 모델은 Y_2 이다. Y_0, C_1, C_2 는 실측값에 의존하며, 두 모델의 조합에 따라 조정이 필요하다. 모의에서는 Y_0 는 0.5, C_1 은 0.003, C_2 는 0.02로 하였다.

Lorenz 모델과 Logistic 모델 둘의 기여를 조합하여 형성된 부하전류는 그림(2-1-5)와 같이 모의되었다.



그림(2-1-5) 혼합된 모델의 전류-전압

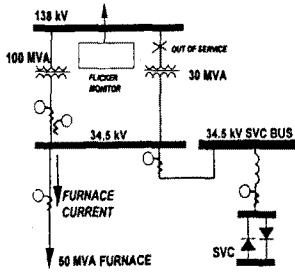
제시된 PSCAD/EMTDC 모델의 user-defined subroutine의 순서도는 그림(2-1-6)과 같다.



그림(2-1-6) 순서도

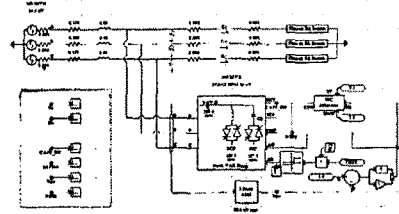
2.2 Highly varying 부하 영향 보상

2.2.1 부하 특성

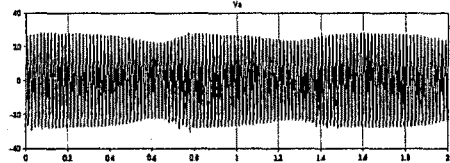


그림(2-2-1) 시험계통

그림(2-2-1)은 Highly varying 부하인 전기로에 전원을 공급하는 전형적인 시험 계통이다. 이 계통과 데이터의 출처는 Roanoke Electric Steel Company이다[3]. 시험계통은 그림(2-2-2)에 보여지고 있다. 등가전원의 공급전압은 34.5 kV이다. 등가 임피던스로 저항이 0.18 Ω, 인덕턴스가 0.01 H이다.



그림(2-2-2) PSCAD/EMTDC DRAFT

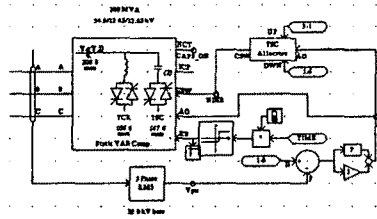


그림(2-2-3) SVC OFF시 공급 모션전압

본 부하 모델이 나타낼 수 있는 혼합 특성 증저주파 영역에서의 변동 사항을 반영하는 Lorenz 모델만으로 설정되었다[4]. 부하의 X/R 비는 0.1. 기본 어드미턴스는 0.05 simens이다. SVC가 OFF된 상태에서 모의된 공급 모션전압과 부하전류는 다음과 같다.

그림(2-2-3)에서 보여지는 바와 같이 전압 파형의 진폭이 출렁거림을 볼 수 있다. 이는 플리커이다.

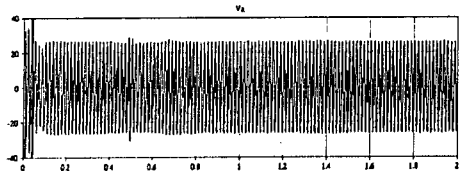
2.2.2 SVC 모델



그림(2-2-4) SVC 모델

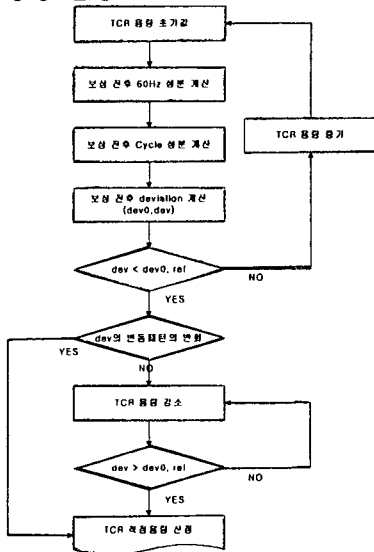
SVC 모델은 PSCAD/EMTDC master library의 표준 모델을 사용하였다[5]. 이 모델의 제어 방안으로 모션전압을 1.0 pu로 유지하게끔 설계되어 있는데, 이 1.0 pu에 해당하는 값은 29.5 kV로 잡았다. 이 값은 보상 전 공급 모션전압 파형의 60 Hz 값으로 가깝게 잡는다. 또한 3 phase RMS 측정 컴포넌트의 smoothing time constant는 0.025 초로 하였다.

PSCAD/EMTDC master library의 기본값에 해당하는 TCR 용량 100.0 MVar, TSC 용량 167.0 MVar을 가지는 SVC를 동작시킬 때의 공급 모션전압과 부하전류는 다음과 같다. 그림(2-2-5)에서 보여지는 바와 같이 전압 파형의 진폭의 출렁거림이 눈에 띄게 없어졌음을 볼 수 있다. 또한 TSC 스위칭에 따른 transients가 보여지고 있다.



그림(2-2-5) SVC ON시 공급 모션전압

2.2.3 용량 산정



그림(2-2-6) SVC 용량 산정 순서도

본 연구에서는 전력품질을 고려한 SVC 용량 산정 방법을 제안한다. 그 방법은 그림(2-2-6)에 보여지는 바와 같은 순서도를 따를 수 있다. 요약하면, 처음에 SVC 용량의 초기값을 선정한 다음 순차적으로 용량을 증가시키던지 감소시키던지 하여 적정 용량을 선정하는 것이다. 다시 말해, SVC OFF 상태에서 전압 파형을 측정하여 60 Hz 성분을 추출하여 기준 rms를 계산한다. 초기값으로 설정된 SVC를 ON하여 모의한 후 보상 파형의 60 Hz rms값과 2.2.4에서 소개할 ARD를 계산한다. 이 값을 순서도에 따라 판단하여 SVC 용량을 증가 또는 감소를 계속하여 적정용량을 선정한다.

2.2.4 보상 평가 지수

대부분의 전력품질 지수들은 파형의 푸리에 스펙트럼에 의존한다. 즉, 이런 지수들은 이산 주파수 스펙트럼을 갖는 주기적인 파형을 평가하는 데 맞추어져 있다. 그러나, Highly varying 부하는 사실상 시간에 따라 변하는 non-stationary 스펙트럼을 갖는다. 또한 flicker를 나타내는 보상 전 파형의 경우는 이산 주파수 스펙트럼으로 나타낼 수 있지만, 보상 후 파형은 flicker라고 볼 수 없다. 그러므로, 이런 파형에 동일한 기준으로 일반적 표준치도인 THD나 flicker modulation factor 등을 적용하기는 어렵다. 이러한 이유로 본 연구에서는

보상기기를 통한 보상효과를 평가하기 위한 지수로써 Average rms deviation(ARD)과 Average peak deviation(APD)를 제안한다.

$$Avg. RMS deviation = \frac{\sum_{n=1}^N |rms(n) - rms_{60Hz}|}{N \times rms_{60Hz}} \quad (2-6)$$

$$Avg. peak deviation = \frac{\sum_{n=1}^N |peak(n) - peak_{60Hz}|}{N \times peak_{60Hz}} \quad (2-7)$$

여기서, rms(i)과 peak(i)는 각각 i번째 사이클의 rms값과 peak값이고, 분모는 rms_{60Hz}와 peak_{60Hz}는 각각 샘플링된 파형의 60Hz 성분의 rms값과 peak값이다. 그리고, N은 샘플링된 파형에 들어있는 사이클의 갯수이다.

ARD는 매 사이클 마다의 rms값을 계산하여 60 Hz 성분에 대한 deviation을 pu으로 환산한 값이다. 마찬가지로 APD는 매 사이클 마다의 peak값을 계산하여 60 Hz 성분에 대한 deviation을 pu으로 환산한 값이다. 이 지수는 사이클마다의 전압 크기가 기준 전압에 대비하여 평균적으로 어느 정도 진동하는가를 나타낼 수 있다. 이상적인 정현파의 경우는 두 값 모두 0이 나올 것이고, 0.2의 modulation factor와 10Hz의 modulation frequency를 갖는 flicker의 경우는 각각 0.1130과 0.1267을 갖는다. 본 연구에서 제시하는 용량 산정과는 ARD과 관련이 있다고 볼 수 있다.

2.3 On-line 고조파 정량화 지수

2.3.1 새로운 고조파 정량화 지수의 제안

고조파의 영향을 전압과 전류 중 하나에 국한하여 표현하여 실제적인 영향이 간과될 수 있다는 단점을 보완하기 위해 전압과 전류 파형 모두에 대한 고조파 왜곡을 표현하고, interharmonics가 동시에 고려될 수 있는 새로운 지수 THED(Total Harmonic Energy Distortion)를 제안한다.

$$THED = \frac{V_{rms} I_{rms} - V_1 I_1}{V_{rms} I_{rms}} \quad (2-8)$$

일반적으로 이용되는 THD의 지수와 비교했을 때, 제안된 지수는 다음과 같은 특징을 갖는다.

- (1) 하나의 변수만을 사용하지 않는다.
- (2) 기본 주파수 성분과 r.m.s. 값을 이용한다. 기본 주파수 성분만을 구함으로 인하여 다른 주파수 성분을 구하는 데 필요한 계산시간을 감소시킬 수 있다.
- (3) $V_{rms} I_{rms}$ 로 계산되는 피상전력에서 기본 주파수 성분에 해당되는 $V_1 I_1$ 의 피상전력의 차이값 구함으로써 기본주파수 외의 모든 고조파에 의한 피상전력을 구하기 때문에 subharmonics와 interharmonics의 경우에도 잘 적용될 수 있다.

삼상 불평형 회로에서 계산된 지수의 값은 각 상에서 다를 수 있으며, 이 경우 전체 삼상 회로에서의 고조파 왜곡에 의한 영향을 정량화하기 위해서

식(4-8)과 같은 지수를 제안한다.

$$THED_{tot} = \sqrt{THED_n^2 + THED_b^2 + THED_k^2} \quad (2-9)$$

여기서,

$$THED = \frac{V_{i,rms} I_{i,rms} - V_{i,1} I_{i,1}}{V_{i,rms} I_{i,rms}} \quad (2-10)$$

THED 지수의 계산에서의 문제는 어떻게 기본주파수 성분을 빨리 구하는가가 온라인 적용 가능 여부를 결정하게 되며 삼상에서 평형 기본주파수 성분을 실시간으로 계산할 수 있는 Instantaneous Phasor Method[6]를 사용한다.

2.3.2 온라인 지수의 개발

전력품질의 온라인 감시는 각 pcc(point of common coupling)에서의 전력 품질을 정량화하여 기 설정된 기준과 비교하여 그 결과를 전력품질 제어센터로 전송함으로써 이뤄질 수 있다. 전력 품질을 저하시키는 원인을 찾기 위해서는 어떤 pcc에서 전력 품질 기준에 대한 위반이 발생하였을 때 해당 지역 전체 pcc에서 전력 품질 지수 값을 동기화하여 보내줘야 한다. 이러한 온라인 적용을 위해서는 정해진 시간 안에 전력 품질을 정량화한 지수의 계산이 이뤄져야 하고, 이러한 목적에는 THD가 적합하지 못하다. 본 연구에서 제안된 THED는 FFT를 통해 전 주파수 범위의 크기 값을 계산하는 대신 측정된 전류와 전압 파형에서 r.m.s.값과 기본파 성분만을 추출하기 때문에 빠른 계산이 가능하고 온라인 전력 품질 감시를 위한 지수로 사용할 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 highly varying 부하의 일반적인 동특성을 예측하기 위한 혼합 혼잡 모델의 PSCAD/EMTDC 모델이 제시되었다. 또한, highly varying 부하의 계통에 대한 영향을 정해진 전력 품질 기준을 만족하도록 보상하는데 필요한 SVC의 용량 산정 방안이 제안되었다. 시뮬레이션을 통해서 제안된 방법의 유용성을 검증하였으며, 제시된 용량은 전력 품질 요구 조건 만족을 위한 추가 조건이 되어 절연 설계, 경제성 등의 다른 조건과 함께 보상 기기 적정 용량 산정에 포함될 수 있다. 제시된 알고리즘에는 다양한 부하, 보상기기, 기준 등이 사용될 수 있고 현재 전 과정을 하나의 PSCAD/EMTDC 모델로 구성하고 있다. 마지막으로, 전력 품질의 저하를 초래하고 고조파 공진 현상을 일으키는 고조파 왜곡 현상을 정량화할 수 있는 새로운 지수를 제안하였으며, 검증을 통해 그 유용성을 입증하였다. 제안된 THED 지수는 실측을 통해 r.m.s. 값을 구하고 기본 주파수 성분만을 추출함으로써 계산이 가능하여 점점 그 필요성이 증대되는 온라인 전력 품질 감시에 활용이 가능하다. 또한 전압과 전류의 고조파 왜곡을 동시에 정량화함으로써 실질적인 고조파 왜곡에 대한 영향을 표현할 수 있다. 하지만, 기존의 고조파 정량화 지수 THD와 TIHD의 경우 기본 주파수 외의 다른 정수 고조파 및 유리수 고조파를 각각 구하고 있기 때문에 이들

에 대한 영향정도에 따라서 가중치를 줄 수 있지만 본 연구에서 제안하는 THED 지수는 기본 주파수 성분만을 구함으로 인하여 가중치를 줄 수 없다는 단점이 있다. 따라서, 특정 고조파의 영향을 표현할 수 있는 지수로의 확장이 요구된다. 본 연구의 기대 효과로서 기술적으로는 비선형 highly varying 부하 해석기술 및 모델을 확보 하였고, 이 부하의 계통 영향을 보상할 수 있는 보상기기인 SVC 과도현상 해석 모델을 또한 확보 하였다. 그리고, 이 보상기기에 의한 highly varying 부하 영향 보상 대책을 수립할 수 있다. 경제적, 산업적 측면으로는 보상 설비의 최적 운용으로 전력 품질을 개선하고 신뢰도를 향상시켜 산업체의 운용 비용 절감 및 생산성 향상을 가져올 수 있고, 전력 품질에 의한 다른 전력 설비 및 부하의 피해를 정량화할 수 있는 기반을 마련하였다. 또한, 향후 전력 품질의 고급화 추세에 따른 고성능 배전용 FACTS 설치 계획 및 운용 최적화에 활용하여 설비의 최적 위치 선정으로 중복 투자 방지를 통한 경제적인 이익을 확보할 수 있다. 과학적 측면으로는 본 연구를 통해 관련 학문인 전력계통, 수학 등에 대한 학문 활동을 활발하게 하였고 전력 품질 기술 연구 기반을 마련했다고 할 수 있다.

4. 참 고 문 헌

- [1] E. O'Neill-Carrillo, G.T. Heydt, E.J. Kostelich, S.S. Venkata, A. Sundaram, "Nonlinear Deterministic Modeling of Highly varying Loads", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 14, No. 2, April 1999
- [2] PSCAD/EMTDC Installation & Administration manual and EMTDC User's manual
- [3] G. Jang, W. Wang, "Electric Arc Furnaces: Chaotic Load Models and Transient Analysis", Lescope Conference, July 1998
- [4] 정문규, 장길수, 이병준, 손광명, "PSCAD/EMTDC를 이용한 Highly varying 부하 모델의 개발", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, 2001
- [5] PSCAD/EMTDC V2.0 User's manual
- [6] Hsu, J S, Instantaneous Phasor Method for Obtaining Instantaneous Balanced Fundamental Components for Power Quality Control and Continuous Diagnostics, IEEE Transactions Power Delivery, Vol. 13, No. 4, Oct. 1998.