

전력회사의 스타콘 투입시 과도 전압 상승과 고조파 분석에 관한 연구

(A Study on the Analysis of Transient Overvoltages and Harmonics
due to Utility STATCON Switching)

김경철* · 서범관 · 송영주 · 이일무

(Kyung - Chul Kim · Beom - Gwan Seo · Young - Joo Song · Il - Moo Lee)

요 약

전력회사와 수용가들은 유도성 부하에 무효전력을 공급하여 역률(수용가)이나 전압(전력회사)을 조절하기 위해 커패시터 뱅크(전력회사는 스타콘이라 함)를 설치 운영하고 있다. 본 논문에서는 전력회사의 스타콘 투입시 발생하는 과도 전압 상승과 고조파를 분석하고자 한다. 과도 전압과 고조파를 저감시키는 간단한 수단중의 하나는 수용가의 커패시터 뱅크를 전력회사의 스타콘을 투입한 후에 과도상태가 지난뒤에 투입하는 방법이다. EDSA 프로그램으로 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하여 수용가에서의 과도 전압 상승과 고조파 저감 효과를 검증 하였다. 그리고 수용가에서 발생하는 고조파를 잘 알려진 국제 고조파 관리 기준인 IEEE 519와 IEC 1000으로 비교해 보았다.

Abstract

The utility and many customers employ capacitor banks(STATCON so called at the utility) to help control the power factor(customers) or voltage(the utility) by supplying reactive power to inductive loads. This paper presents analysis of transient overvoltages and harmonics due to utility STATCON switching. One simple and inexpensive means of limiting the voltage magnification transient and reducing harmonics is to switch the capacitor banks on a few minutes after the STATCON has been switched. Simulation results used the EDSA software package show the effects of decreased the transient voltage and harmonic reduction at the customer. And also harmonic limits based on the well-known international harmonic standards IEEE 519 and IEC 1000 are evaluated for the customer.

Key Words : Transient overvoltages, Harmonics, Capacitor banks, STATCON, IEEE 519, IEC 1000

1. 서 론

* 주저자 : 홍익대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수
Tel : 041-860-2568, Fax : 041-863-7605
E-mail : yangjier@hongik.ac.kr
접수일자 : 2003년 5월13일
1차심사 : 2003년 5월27일
심사완료 : 2003년 7월 8일

배전 변전소의 스타콘(STATCON : Static Condenser)은 부하가 증가함에 따라 전압이 떨어지는 것을 보상하기 위해 투입되고, 경부하시에는 전압이 올라가므로 계통에서 분리시키는 작업을 반복하는 장치이다[1].

스타콘이 투입되면 전력회사와 수용가 사이에 임

전력회사의 스타콘 투입시 과도 전압 상승과 고조파 분석에 관한 연구

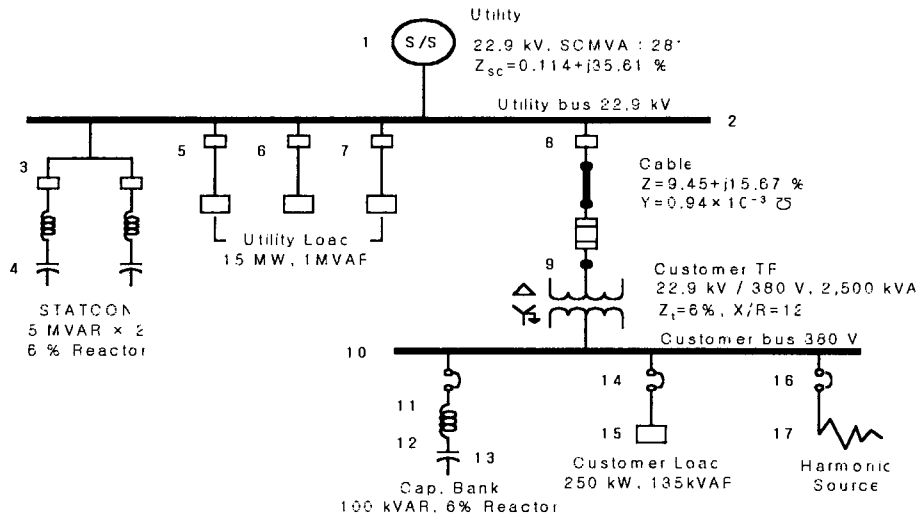


그림 1. 사례 연구 배전 시스템의 단선도
Fig. 1. Single-line diagram of the distribution system under study.

피턴스 병렬공진이 발생하고, 돌입전류에 의한 과도 전압이 상승하며, 수용가에는 고조파를 증가시켜 전압과 전류의 상승을 초래한다[2][3]. 과도 전압 상승과 고조파 증가로 인한 장애로는 형광등 깜빡임, 컴퓨터 일시 정지, 엘리베이터 일시 정지, 변압기 소음 발생, 통신 장비나 민감한 전자 장비의 오동작 등이 있을 수 있다.

최근 수용가에는 고조파를 발생시키는 전자 장비의 증가로 인하여 배전계통의 고조파 평가가 전력회사와 수용가 모두에게 필요한 시점이며 엘리베이터 일시 정지와 같은 민원이 발생 하였을 때 원인을 규명하고 책임소재를 밝히는데 고조파 관리 기준을 적용하면 효과적이다. 고조파 관리기준 적용시 전력회사는 수용가 인입구(PCC : the Point of Common Coupling)까지 양질의 전압을 공급할 책임이 있으므로 수용가 인입구에 고조파 전압 제한치를 규정하고, 수용가에는 부하에서 발생하는 고조파 전류 제한치를 규정하면 된다.

본 논문에서는 사례 연구 배전 시스템을 구성하고, 스타콘 투입시 발생하는 과도 전압 상승과 고조파 증가 현상을 분석하고자 한다. 과도 전압과 고조파를 저감시키는 간단하고 저렴한 수단으로는 수용가의 커패시터 뱅크를 전력회사의 스타콘을 투입한

후 과도상태가 경과한 뒤에 투입하였을 경우 효과를 알아 보았다.

EDSA 프로그램[4][5]을 사용한 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 실측 데이터로 수용가에서 과도 전압 및 고조파 저감 효과를 확인 하고자 한다. 또한 수용가의 고조파를 국제 고조파 관리 기준인 IEEE 519-1992와 IEC 1000-1996으로 평가해 보았다.

2. 사례 연구 배전 시스템

그림 1은 사례 연구 배전 시스템의 단선도이다. 배전 변전소는 공급전압이 22.9[kV], 단락용량이 281[MVA], 단락 임피던스는 100[MVA] 기준으로 $0.114+j35.61[\%]$ 이다. 배전 변전소에는 6[%] 리액터를 가진 5[MVAR] 스타콘 2대가 배전전압을 조절하고 스타콘 투입시 전력회사의 부하는 $15+j1[MVA]$ 이다.

배전 선로는 22.9[kV] 전력 케이블이고, 100 [MVA] 기준으로 선로 임피던스는 $9.45+j15.67[\%]$, 선로 어드미턴스는 $0.94 \times 10^{-3}[S]$ 이다.

수용가 변압기는 조명 부하용(TR1) 1,000[kVA], 동력 부하용(TR2) 1,500[kVA] 2대가 있다. 편의상 한대로 등가 변환하여 22.9[kV]/380[V], 2,500[kVA],

임피던스 $Z_f=6\%$, $X/R=12$ 이라 한다. 수용가의 커패시터 뱅크는 $100[kVAR]$ 이고, 6% 리액터가 직렬로 연결되어 있다. 부하는 $250+j135[kVA]$ 이다. 고조파 분석 시뮬레이션을 하기 위해서 고조파 발생원은 한전측과 수용가측의 실측한 데이터를 BMI 장비로 측정한 $31[kVA]$, 96% 역률, 전류 왜형을 29% 의 측정값으로 해석하였다.

3. 등가 변환 회로

스타콘 스위칭시 발생하는 전자 과도 현상을 분석하기 위해서는 적절한 등가 변환 회로로 변환하여야 한다. 실제통의 배전 시스템은 선로정수, 불평형등으로 3상으로 해석해야 하지만, 편의상 평형 3상으로 취급하여 단상으로 변환시키고, 모든 단위는 단위법으로 환산한 값을 사용하였다.

전력회사는 전압원으로 나타낸다. 전압원은 크기 (Volts), 위상(Degrees), 주파수(Hertz)로 표현한다. 인덕턴스(Henry)는 초기 조건으로 전류크기(Ampere), 위상(Degrees)이 필요하며 스위치는 투입하거나 개방할 때 필요한 소자로 쓰인다. 스위치 소자의 상태가 개방인지, 투입인지를 파악하여 개방시간 (msec)이 입력으로 사용된다.

부하는 저항 $R[Ohms]$ 과 리액턴스 $X_L[Ohms]$ 가 직렬로 연결된 임피던스로 등가화 시킨다. 커패시터 뱅크와 스타콘은 인덕턴스 $L[Henry]$ 과 캐패시턴스 $C[Farad]$ 가 직렬로 연결된 임피던스이다. 변압기는 간소화된 것으로 저항과 리액턴스가 직렬로 연결된 임피던스로 나타낸다.

그림 2는 전자 과도 현상을 분석하기 위하여 그림 1을 단상 등가 변환시킨 회로도이다.

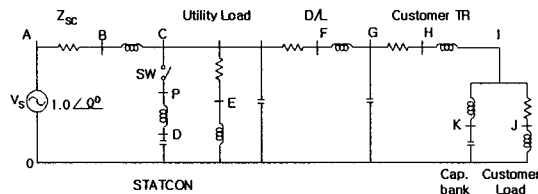


그림 2. 등가 변환 회로도
Fig. 2. Equivalent circuit diagram

그림 2의 각 소자는 시스템 기준 $S_b=10[MVA]$, 고압측 전압기준 $V_{bs}=22.9[kV]$, 저압측 기준 $V_{bl}=0.38 [kV]$ 으로 하여 구한다. 표 1은 등가 변환 회로의 EDSA 프로그램 입력 데이터를 간추려 놓았다.

표 1. 등가변환 회로의 입력 데이터
Table 1. Input data for the equivalent circuit

Component	Value [pu]	Remark
V_{OA}	1.0	Utility 공급전원
R_{AB}	0.000114	Utility 단락 저항
L_{BC}	0.00009446	Utility 단락 인덕턴스
L_{PD}	0.000305	STATCON Reactor
C_{DO}	0.001326	STATCON Capacitor
R_{CE}	0.6639	Utility Load (R)
L_{EO}	0.0001115	Utility Load (L)
R_{CF}	0.009455	D/L (R)
L_{FG}	0.00004156	D/L (L)
$C_{CO} = C_{GO}$	0.00006564	D/L (B)
R_{GH}	0.01993	Customer TR (R)
L_{HI}	0.0006344	Customer TR (L)
L_{IK}	0.004559	Customer Reactor
C_{KO}	0.00002653	Customer capacitor
R_{IJ}	31.0589	Customer Load (R)
L_{JO}	0.04446	Customer Load (L)

4. 임피던스 응답특성

임피던스 응답특성을 그래프로 보면 병렬공진이나 직렬공진 현상을 쉽게 파악할 수 있다. 그림 3에서 전력 회사에서의 특성은 제 3고조파 부근에서 병렬공진을 일으키고 6% 리액터의 영향으로 제 4고조파 부근에서 고조파 저감 필터로 작용되고 있다. 스타콘이 없으면 임피던스는 주파수의 크기에 따라 선형적으로 변한다.

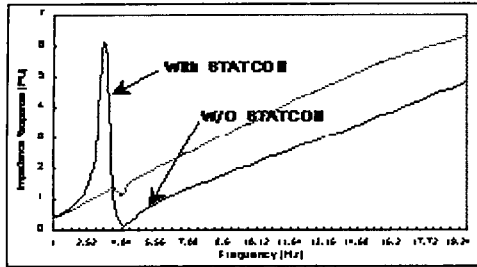


그림 3. 전력회사 모선에서의 임피던스 응답특성비교
Fig. 3. Impedance response comparisons at Utility bus

수용가의 임피던스 응답특성은 그림 4에서 보여 주고 있다. 수용가는 정부의 영향으로 모든 주파수대에서 임피던스가 크게 나타난다. 커패시터 뱅크의 6% 리액터 영향으로 크기는 작지만 제 4고조파 부근에서 고조파 저감 필터로 작용되고, 제 3고조파 부근에서 병렬공진을 일으켜 고조파가 증가될 수 있다. 수용가의 임피던스 특성은 모든 주파수 영역에서 고조파에 매우 민감한 반응을 나타내고 있다.

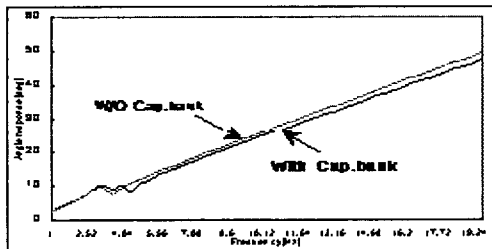


그림 4. 수용가 모선에서의 임피던스 응답특성비교
Fig. 4. Impedance response comparisons at Customer bus

5. 과도 현상 분석

60[Hz] 정현파 전압이 공급될때, 스타콘 스위치를 전압이 최고값에 도달하는 시간($4/60=0.0042$ sec)에 투입하여 전력회사 모선과 수용가 모선의 전압과 전류 파형을 관찰한다.

그림 5는 전력회사 모선의 전압파형으로 단락 리액턴스와 6% 리액터의 영향으로 전압파형은 두개

의 산봉우리 모양을 하게 된다. 전압 최대치는 약 1.18[pu]이고, 배전 시스템의 큰 리액턴스 영향으로 파형이 많이 왜곡 되었다. 그림 6은 실측한 결과로 전압 최대치는 약 1.14[pu]이었고, 파형은 시뮬레이션과 유사했다.

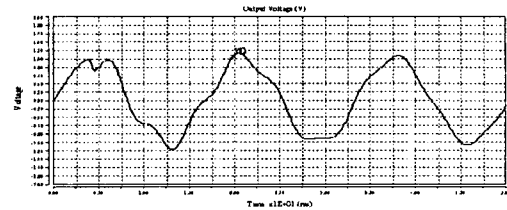


그림 5. 전력회사 모선에서의 시뮬레이션 전압파형
Fig. 5. Simulated voltage waveform at Utility bus

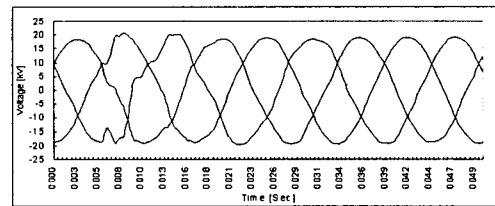


그림 6. 전력회사 모선에서의 측정된 3상 전압파형
Fig. 6. Measured 3-phase voltage waveforms at Utility bus

그림 7은 수용가 모선의 전압파형으로 스타콘 스위칭에 의해 전력회사 모선의 전압파형과 거의 같은 모양을 하고 있다. 전압 최대치는 약 1.2[pu]이고, 전력회사 모선의 전압보다 더 많이 왜곡되었다. 그림 8은 실측한 결과로 전압 최대치는 약 1.12[pu]이다.

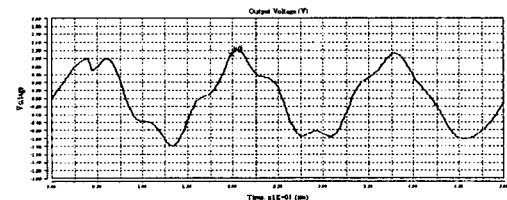


그림 7. 수용가 모선에서의 시뮬레이션 전압 파형
Fig. 7. Simulated voltage waveform at Customer bus

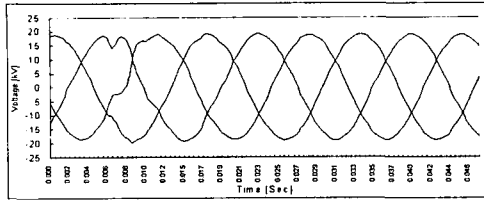


그림 8. 수용가 모선에서의 측정된 3상 전압파형
Fig. 8. Measured 3-phase voltage waveforms at Customer bus

그림 9는 수용가 모선의 선로 전류 파형으로 전류 최대치는 약 3.0[pu]이다. 스타콘으로 인한 고조파의 증가로 파형이 심하게 왜곡되었다. 그림 10은 실측한 결과로 전류 최대치는 약 2.0[pu]이었고, 파형은 커패시터 बैं크와 스타콘의 영향으로 스타콘 투입후에 더 많이 왜곡 되었다.

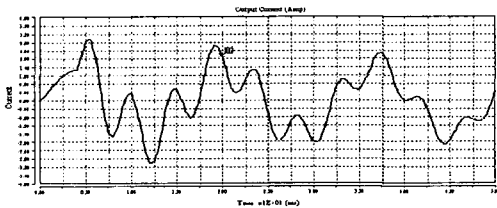


그림 9. 수용가 모선에서의 시뮬레이션 선로전류파형
Fig. 9. Simulated Customer branch current waveform

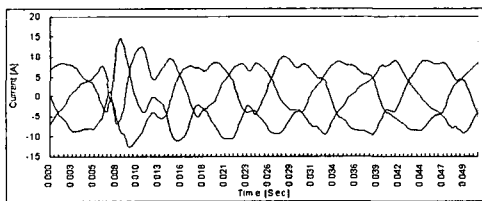


그림 10. 수용가 모선에서의 측정된 3상 선로전류파형
Fig. 10. Measured 3-phase branch current waveforms at Customer bus

이와 같이 수용가의 과도 전압 상승과 과도 전류 증가는 수용가에 형광등 깜빡임, 엘리베이터 일시 정지, 컴퓨터 일시 정지, 변압기 소음 발생, 통신장비나 민감한 전자 장비의 오동작을 일으킬 수 있다.

스타콘 투입시 발생하는 과도전압 상승과 과도 전

류 증가를 줄이는 방법으로 가장 간단하고 저렴한 수단은 수용가의 커패시터 बैं크를 과도 상태동안 개방시키면 된다. 표 2는 수용가 커패시터 बैं크의 스타콘 투입시 미치는 영향을 분석하고 있다. 수용가의 커패시터 बैं크를 개방시키면 최대 전압 크기는 약 2[%] 줄이고 최대 전류 크기는 약 3[%] 줄일수 있다.

표 2. 수용가 커패시터 बैं크의 과도 상태 영향 분석표
Table 2. Transient effects of Customer capacitor bank

구 분	With STATCON & Cap. bank	With STATCON & without Cap. bank
수용가 최대 모선 전압 [pu]	1.197 (100%)	1.173 (-2.0%)
수용가 최대 모선 전류 [pu]	3.0 (100%)	2.9 (-3.3%)

6. 고조파 분석 및 평가

스타콘 투입시에는 전력회사측과 수용가 사이의 임피던스 병렬공진에 의하여 수용가에는 고조파가 증폭된다.

고조파를 줄이는 방법으로 앞에서 설명한바와 같이 수용가의 커패시터 बैं크를 스타콘 투입시 개방시켰을때 효과를 표 3에 간추려 놓았다. 커패시터 बैं크가 없으면 전압 왜형율이 약 24[%] 감소하고, 전류 왜형율은 약 45[%]만큼 감소 될 수 있다. 이는 고조파 발생원의 크기와 고조파 함유량에 따라 다를 수 있다. 본 논문에서 고조파 분석 및 평가에는 수용가의 부하 284[kVA], 88[%]역률에 고조파 발생원으로 실측한 31[kVA], 96[%]역률, 전류 왜형율 29[%]를 수용가 모선에 병렬로 연결 시켰을때의 시뮬레이션 결과를 분석한 것이다.

표 3. 수용가 커패시터 बैं크의 고조파 영향 분석표
Table 3. Harmonic effects of Customer capacitor bank

구 분	With STATCON & Cap. bank	With STATCON & without Cap. bank
수용가 모선 전압 왜형율 [%]	1.08 (100%)	0.82 (-24.1%)
수용가 선로 전류 왜형율 [%]	4.74 (100%)	2.58 (-45.6%)

전력회사의 스타콘 투입시 과도 전압 상승과 고조파 분석에 관한 연구

그림 11은 수용가의 고조파 발생원으로 실측한 데이터를 EDSA 프로그램에으로 시뮬레이션한 파형이다. 그림 12는 수용가 모선의 전압 파형을 나타내고, 그림 13은 수용가와 전력회사 사이에 흐르는 전류 파형을 시뮬레이션한 것이다.

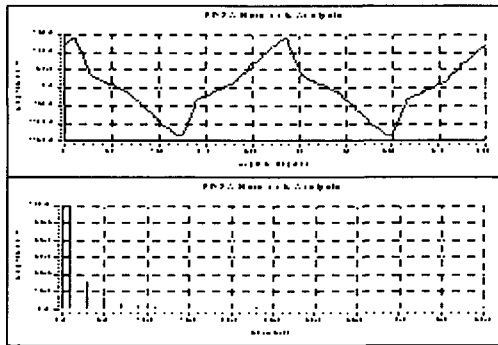


그림 11. 수용가 모선의 고조파 발생원
Fig. 11. Harmonic source at Customer bus

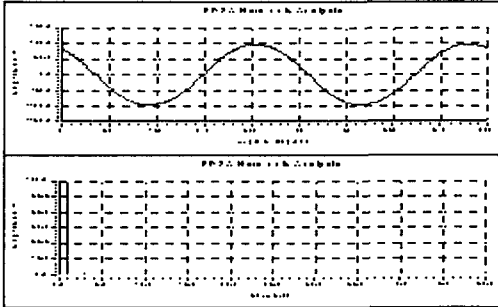


그림 12. 수용가 모선의 전압 파형
Fig. 12. Voltage waveform at Customer bus

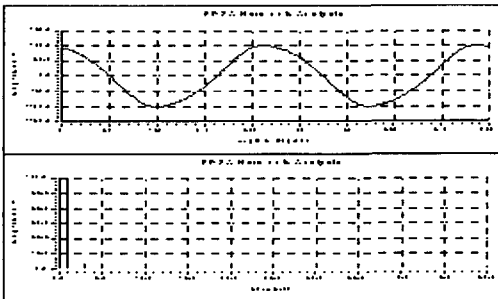


그림 13. 수용가의 선로 전류 파형
Fig. 13. Branch current waveform at Customer bus

본 논문에서 스타콘 투입 전후의 고조파 변화를 국제 고조파 관리 기준인 IEC 1000과 IEEE 519에 의해 분석하고 평가하였다. 고조파 평가는 1시간 평균치 한 것이다. 표 4는 수용가 모선의 고압측 고조파 전압 제한치를 나타내며, 스타콘 투입 전에는 약 1.07[%]에서 투입후에는 약 1.0 [%]으로 감소하였고 IEC 1000-3-6 (1kV<Un≤35kV)[6]의 제한치 6.5[%]와 IEEE 519 (Vn≤69kV)[7]의 제한치 5[%]보다 낮은 값을 나타내었다.

표 4. 수용가 고압측의 고조파 전압 제한치
table 4. Harmonic voltage limits at PCC

Harmonic order [h]	limits		Before STATCON			After STATCON		
	IEC 1000-3-6 1kV<Un≤35kV [%]	IEEE 519 Vn≤69kV [%]	A 상 [%]	B 상 [%]	C 상 [%]	A 상 [%]	B 상 [%]	C 상 [%]
3	4.0	3.0	0.53	0.59	0.42	0.72	0.79	0.45
5	5.0	3.0	0.61	0.72	0.58	0.11	0.31	0.17
7	4.0	3.0	0.20	0.42	0.20	0.16	0.37	0.21
9	1.2	3.0	0.46	0.38	0.37	0.54	0.44	0.43
11	3.0	3.0	0.24	0.10	0.11	0.24	0.09	0.14
13	2.5	3.0	0.26	0.10	0.31	0.24	0.09	0.33
15	0.3	3.0	0.30	0.08	0.24	0.24	0.08	0.32
17	1.6	3.0	0.13	0.10	0.18	0.11	0.11	0.33
19	1.2	3.0	0.12	0.11	0.34	0.12	0.11	0.33
21	0.2	3.0	0.11	0.09	0.14	0.13	0.13	0.15
23	1.2	3.0	-	-	-	-	-	-
25	1.2	3.0	-	-	-	-	-	-
VTHD	6.5	5.0	1.08	1.12	1.01	1.03	1.06	0.93

스타콘 투입전후의 고조파 전류에 대한 평가는 수용가의 동력부하(TR2) 저압측에서 실측한 데이터를 사용하였다. IEC 1000-3-4 기준(선로전류 16[A]이상 75[A]이하인 불평형 3상 부하인 경우[8]와 고조파가 발생하는 장비들의 조합으로 취급하는 경우[9]) 적용을 위한 단락비(R_{see})을 구하면 다음과 같다.

$$R_{see} = \frac{\text{단락용량}}{\text{부하용량}} = \frac{281}{1.5} = 187 \quad (1)$$

고조파 전류 제한치는 고조파 왜형률(THD : Total Harmonic Distortion)로 구한다. 표 5에서 고조파 왜형률은 스타콘 투입전에는 A상, B상은 기준치 이하이고 C상은 기준치를 초과하고, 스타콘 투입 후에는 A상과 C상이 기준치를 많이 초과하는 것을 알수 있다. C상은 A, B상에 비해 상대적으로 경부하인 점을 고려해야 한다.

IEEE 519-1992 기준 적용을 위하여 단락비(SCR : Short Circuit Ratio)는 다음과 같이 구한다.

$$I_{sc} = \frac{S}{\sqrt{3} VZ_t} = \frac{1500 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.06} = 37984 [A] \quad (2)$$

$$I_L = \frac{P_{L,max}}{\sqrt{3} V \cos \theta_{avg}} = \frac{255.4 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.978} = 396.78 [A] \quad (3)$$

$$SCR = \frac{I_{sc}}{I_L} = \frac{37984}{396.78} = 95.7 \quad (4)$$

여기서 I_L 은 수용가의 연간 평균 최대 전류이다. 수용가의 연간 최대 전력 $P_{L,max}$ 는 255.4[kW]이고, 평균 역률 $\cos \theta_{avg}$ 는 97.8[%]으로 수용가의 1년치 전기요금표에서 구한값이다. 수용가의 고조파 전류 제한치는 수요 왜형률(TDD : Total Demand Distortion)로 구한다. 표 6에서 수요 왜형률은 스타콘 투입후에 A상의 제 3고조파만 초과하는 것을 볼 수 있다. 또한 스타콘 투입전보다 투입후에는 고조파가 많이 증가하는 현상을 확인할 수 있다.

표 5. 수용가 저압측의 고조파 전류 제한치(THD)
Table 5. Harmonic current limits(THD) at PCC

Harmonic order [h]	limits		Before STATCON			After STATCON		
	IEC 1000-3-4 2 단계 Rsc=175[%]	IEC 1000-3-4 Whole Installation	A 상 [%]	B 상 [%]	C 상 [%]	A 상 [%]	B 상 [%]	C 상 [%]
3	29.0	19.0	20.6	6.7	25.2	29.4	7.9	48.6
5	14.0	9.5	11.7	17.9	21.7	15.5	25.0	32.6
7	11.0	6.5	4.9	7.4	7.8	7.6	12.4	16.1
9	8.0	3.8	2.0	0.3	3.3	3.1	0.5	6.7
11	7.0	3.1	1.7	2.2	2.3	2.1	3.0	4.0
13	6.0	2.0	0.4	0.7	1.2	0.3	1.1	1.7
15		0.7	0.3	0.6	1.1	0.4	0.6	1.9
17		1.2	0.4	0.4	1.1	0.3	0.9	1.3
19		1.1	0.3	0.3	0.5	0.3	0.2	0.4
21		0.6	0.3	0.2	0.8	0.1	0.5	0.9
23		0.9	0.6	0.1	1.0	0.5	0.3	0.7
25		0.8	0.2	-	0.3	0.1	0.4	0.7
27		0.6	0.1	0.1	-	0.1	-	0.2
29		0.7	-	0.1	-	-	-	0.2
31		0.7	-	-	0.2	-	-	0.1
33		0.6	-	-	-	-	-	-
35		0.6	-	-	-	-	-	-0.1
ITHD[%]	33.0	20.0	24.3	20.6	34.5	34.3	29.2	61.3

표 6. 수용가 저압측의 고조파 전류 제한치(TDD)
Table 6. Harmonic current limits(TDD) at PCC

Harmonic order [h]	limits IEEE 519 50<SCR<100 [%]	Before STATCON			After STATCON		
		A 상 [%]	B 상 [%]	C 상 [%]	A 상 [%]	B 상 [%]	C 상 [%]
3	10.0	8.0	2.5	5.5	10.6	2.7	8.0
5	10.0	4.5	6.7	4.7	5.6	8.5	5.4
7	10.0	1.9	2.8	1.7	2.7	4.2	2.6
9	10.0	0.8	0.1	0.7	1.1	0.2	1.1
11	4.5	0.7	0.8	0.5	0.8	1.0	0.7
13	4.5	0.2	0.3	0.3	0.1	0.4	0.3
15	4.5	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3
17	4.0	0.2	0.2	0.2	0.1	0.3	0.2
19	4.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
21	4.0	0.1	0.1	0.2	0.0	0.2	0.1
23	1.5	0.2	0.0	0.2	0.2	0.1	0.1
25	1.5	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1
27	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
29	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
31	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
33	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
35	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VTHD	5.0	1.08	1.12	1.01	1.03	1.06	0.93

그림 14는 스타콘 투입전의 수용가 동력부하 전류이다. 그림 15는 스타콘 투입후의 수용가 동력부하 전류 파형이다.

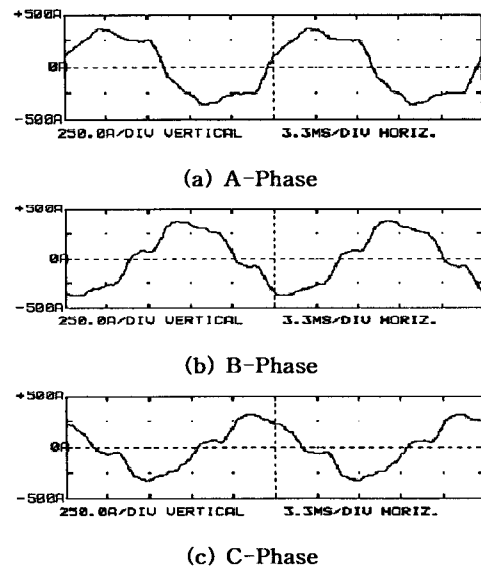


그림 14. 스타콘 투입전의 실측된 수용가 선로 전류 파형
Fig. 14. Measured Customer branch current wave forms before STATCON switching

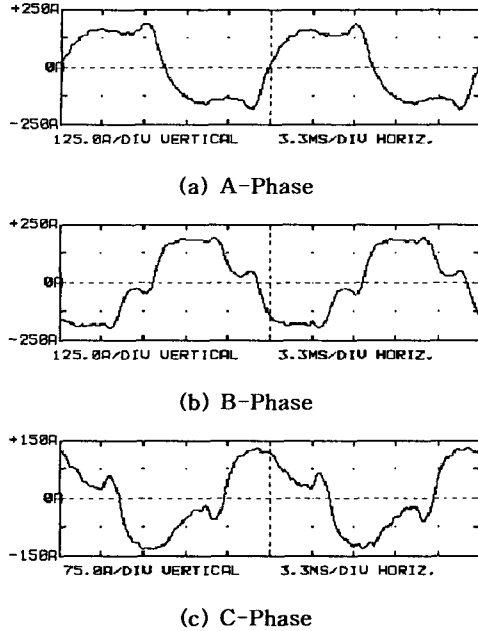


그림 15. 스타콘 투입후의 실측된 수용가 선로 전류 파형
Fig. 15. Measured Customer branch current wave forms after STATCON switching

7. 결 론

전력회사의 스타콘 투입시에는 전력회사와 수용가 사이의 임피던스 병렬공진에 의한 고조파 증가로 수용가의 전류와 전압을 왜곡시키고 과도 전압 상승과 고조파 장해를 일으키게 된다.

사례연구 배전 시스템의 임피던스 응답곡선은 전력회사 모선에서 제 3고조파 부근에 병렬 공진을 일으키고, 제 4고조파 부근에서 고조파 필터 역할을 하게 되어있다. 수용가에는 전력회사의 낮은 단락 임피던스와 상대적으로 높은 수용가의 임피던스 응답 특성으로 거의 모든 주파수 영역에서 고 임피던스가 된다. 즉, 고조파에 매우 민감하게 반응을 하게 되어 있고, 실측 결과도 스타콘 투입후에는 고조파가 많이 증가 하였다.

전자 과도 분석에서 스타콘 투입시 전압파형을 실측과 컴퓨터 시뮬레이션 결과가 비슷한 모양을 나타내었다. 전압 최대치는 실측은 약 1.14[pu]이고, 시뮬레이션은 1.2[pu]이었다. 실측한 파형을 보면 스타콘 투입으로 고조파가 증가하여 더욱 파형이 왜곡됨을

알 수 있다. 수용가에서 전자 과도 전압 상승을 줄이는 방안으로 수용가의 커패시터 뱅크를 제거하고 스타콘을 투입하면 전압의 최대치는 약 2[%], 전류의 최대치는 약 3[%] 줄일수 있음을 시뮬레이션으로 확인 하였다. 근본적으로 전자 과도 전압 상승을 줄이는 수단은 전력회사 모선 전압과 스타콘 전압의 위상이 영점에서 투입(Synchronous Closing) 되도록 하는 것이다.

스타콘 투입후에는 배전 시스템의 임피던스 특성에 의해 수용가에는 고조파가 증폭된다. 부하에 따라 차이는 있지만 수용가의 커패시터 뱅크를 개방시키고 스타콘을 투입하면 전압 왜형율은 약 24[%], 전류 왜형율은 약 45[%] 줄일 수 있었다.

또한 사례연구 배전 시스템에서 수용가가 발생하는 고조파를 국제 고조파 관리 기준으로 평가해 보았다. 수용가 인입구에서의 전압 왜형율은 약 1.1[%]으로 IEC 1000-3-6의 6.5[%]와 IEEE 519-1992의 5[%]에 기준치보다 훨씬 낮은 값을 나타내었다. 반면 수용가 전류 왜형율(THD)은 스타콘 투입전에는 약 26[%]에서, 스타콘 투입후에는 약 42[%]로 증가되어 IEC 1000-3-4의 33[%]를 초과 하였다. IEEE 519-1992 제한치 12[%]에서 전류 수요 왜형율(TDD)은 스타콘 투입전에는 약 8[%]에서, 스타콘 투입후에는 약 11[%]로 증가되었지만 기준에는 미치지 못했다.

향후에는 수용가뿐만 아니라 배전 시스템 전체계통으로 확대 적용하여 스타콘 투입시 발생하는 현상을 비교 분석하고자 한다.

References

- (1) IEEE Std 1036-1992, "IEEE Guide for Application of Shunt Power Capacitors".
- (2) R. C. Dugan, M. F. McGranahan, H. W. Beaty, "Electrical Power System Quality", McGraw-Hill Co, pp. 10-38, 1996.
- (3) P. Chowchuri, "Electromagnetic Transients in Power System", John Wiley & Sons Inc, pp. 226-238, 1996.
- (4) EDSA User's guide, "Electromagnetic Transient Analysis Program", EDSA Micro Co, 2000.
- (5) EDSA User's guide, "Electrical Power System Harmonic Analysis Program", EDSA Micro Co, 2000.

- [6] IEC 1000-3-6, "Assessment of Emissions Limits for Distorting Loads in MV or HV Power Systems", 1996.
- [7] IEEE Std 519-1992, "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonics Control in Electrical Power Systems".
- [8] IEC 1000-3-4, "Limits for Harmonic Current Emissions", April, 1995.
- [9] T. S. Key and T. J. Lai, "IEEE and International Harmonic Standards Impact on Power Electronic Equipment Design", Industrial Electronics, Control and Instrumentation Conference, 9-14 Nov 1997.

이 논문은 2003학년도 홍익대학교 교내 연구비에 의하여 지원되었음.

◇ 저자소개 ◇

김경철 (金慶哲)

1954년 1월 20일생. 1977년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1977~1982 국방과학연구소 연구원. 1982~1984 NMSU 전기공학과 석사. 1984~1988 UTA 전기공학과 박사. 1988~1991 한국전기연구소 선임연구원. 1991~현재 홍익대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수.

서범관 (徐梵寬)

1977년 2월 18일생. 2002년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2002년~현재 홍익대학교 대학원 석사과정.

송영주 (宋榮柱)

1970년 11월 21일생. 1993년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995~2001 포스콘 기술연구소 연구원. 2001~현재 동 대학원 박사과정.

이일무 (李一茂)

1971년 7월 16일생. 2000년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001~현재 (주)피에스디테크 연구원. 2003~현재 동 대학원 박사과정.