

철강산업에서 전력계통 고조파 해석

오동환*, 이강완*
포항종합제철(주)*, 대화기술단

Harmonic analysis of the steel & iron industry power system

Dong Whan Oh*, Kang Wan Lee
Pohang Iron & Steel Co., Ltd., DAEHWA Engineering & Consultants

Abstract - 본 논문은 대용량 전력을 사용하는 철강산업 전력계통에서 고조파 전압과 전류 등을 현장 실측하여 고조파 발생 설비를 모의하여 고조파를 해석한 설계용 연구 사례로 전력계통 전반에 나타나는 고조파 전압과 전류 분포를 분석하고 고조파 억제용으로 설치되어 있는 고조파필터용 콘덴서의 공진 가능성 등을 검토한 것이다.

1. 서 론

철강산업은 대용량 전력을 사용하는 업종으로 고도의 플랜트 제어를 위한 마이크로프로세서 및 컴퓨터 등이 많이 사용되는 반면 전기의 품질을 저하시키는 전기아크로, 대형압연기용 전동기 및 이를 구동하는 Thyristor Motor Drive 및 싸이크로컨버터와 같은 대용량 고조파 발생 설비들이 많이 설치되어 운전되고 있다. 이와 같은 대용량 고조파 발생 설비 운전으로 인하여 비교적 많은 고조파가 발생하여 전력계통에 흐르게 됨으로서 전력이기 및 전력케이블을 열화시키고, 개폐장치의 고장을 유발할 뿐 아니라 고조파필터용 콘덴서 또는 리액터 소손 사고 가능성이 증폭되고 있다. 따라서 철강회사 전력계통 신설 또는 증설시 고조파를 해석하고 이의 결과에 따라 고조파 억제 방안이 수립되어야 한다.

본 논문은 철강회사 전력계통의 고조파 발생원인 전기아크로, 압연설비(Mill)용 전동기 및 싸이크로컨버터 고조파 해석 모델을 현장 실측자료 등을 이용해서 개발하여 고조파 분석에 적용한 사례로 전력계통에 나타나는 고조파 전압과 전류 분포를 해석하고 고조파 억제를 위해 설치 되어있는 고조파필터용 콘덴서의 공진 가능성 등을 검토한 것이다.

2. 고조파 해석 전력계통

그림1은 철강회사 전력계통을 나타낸 것으로 한국전력과는 154kV 송전선로로 연계되어 있으며, 많은 자가 발전기들이 계통에 연계되어 병렬 운전되고 있다.

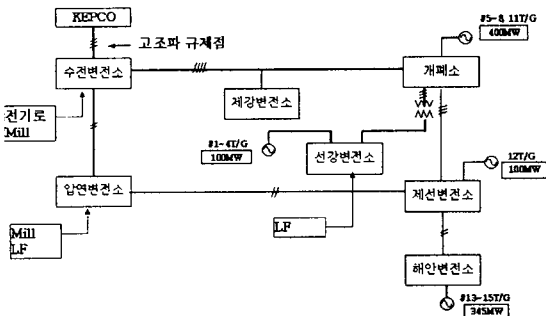


그림1 철강회사 전력계통

수전변전소, 압연변전소, 제선변전소, 해안변전소 및

개폐소는 154kV 변전소로서 이들 변전소간은 154kV 전력케이블로 연계되어 있고 선강변전소는 154/22kV 변압기로 연계되어 있다. 많은 고조파를 발생하는 전기아크로 및 압연설비(Mill)용 싸이크로컨버터 대부분은 수전변전소와 압연변전소에 설치되어 운전되고 있다.

이와 같은 전력계통 고조파 해석은 전력계통 정상운전 조건하에서 일반 조류계산과 발생 가능한 조파별 조류계산으로 이루어진다. 즉, 고조파 해석 대상 전력계통에서 발생 가능한 고조파 범위에 대한 다중해석이다. 따라서 전력계통의 각 요소들을 해당 어드미턴스로 표현하여 네트웍을 구성하고 여기에 고조파 전류원을 삽입하여 해당 조파별 조류계산을 행하여 고조파 전력상태를 해석한다.

3. 고조파 필터

고조파가 많이 발생되는 설비에는 이를 억제하기 위하여 고조파 필터를 설치하게 된다. 고조파 필터는 리액터, 콘덴서와 저항을 조합한 수동형필터(Passive filter)와 여기에 싸이리스터를 결합한 능동형필터(Active filter) 두 가지로 대별된다.

수동형 고조파필터를 설치할 경우는 이로 인하여 특정 고조파가 흡수되어 억제되는 반면 특정 고조파 공진 조건이 발생하거나 또는 공진점이 이동하게 되어 고조파가 증대될 수도 있다. 따라서 고조파 발생설비가 있는 전력계통 신설, 증설 또는 변경시 보다 정확한 고조파 분석 및 고조파 상정해석 등으로 적정 전력계통 구성은 물론 정확한 고조파 억제대책이 수립되어야 한다.

싸이리스터를 결합한 능동형필터는 수동형필터에 비하여 설치비용이 많이 드는 반면 효율적인 제어로 전기적 특성이 변동되는 비선형 전력설비에서 발생하는 고조파를 효율적으로 상쇄할 수 있고, 고조파 공진 우려가 없어 상대적으로 작은 용량으로 고조파를 상쇄할 수 있어 철강산업 전력계통에서는 전기아크로에 이를 대부분 적용하고 있는 실정이다. 그림 2는 싸이리스터를 이용한 능동형필터인 TCR(Thyristor Controlled Reactor) 개념도를 나타낸 것으로 고정리액터와 양방향 싸이리스터 밸브 스위치로 구성된다.

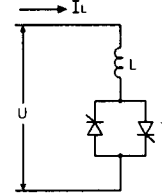


그림2 TCR 개념도

수동형 필터는 고조파를 분로(Shunt)시켜 흡수하거나 또는 지정한 고조파에서 동조가 일어나게 하여 계통간의 고조파 용량을 억제하게 된다. 다음 그림3은 전력

계통에 이용되고 있는 여러 가지 고조파 필터를 나타낸 것이다.

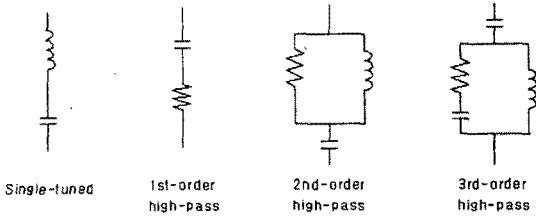


그림3 수동형 필터

가장 대표적인 수동형 필터는 단일동조(Single tuned) 필터이며 경제적인 형태로 널리 이용되고 있다. 다음 그림4는 이의 일 예를 나타낸 것이다.

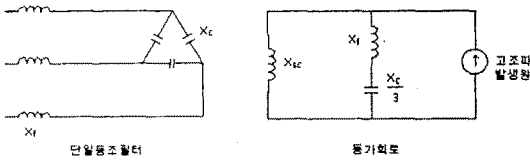


그림4 고조파 필터 등가회로

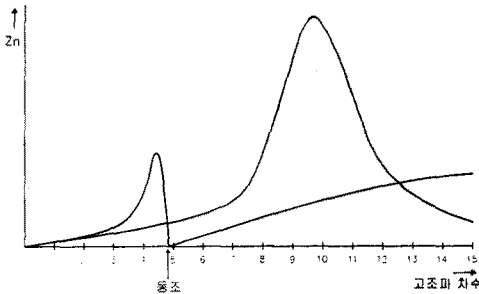


그림5 5차 고조파 동조필터와 계통 주파수 특성

단일동조필터는 특정고조파(동조주파수) 전류에 대해 저임피던스가 된다. 즉, 억제하고자 하는 특정고조파 분로(Shunt) 회로를 구성하여 동조고조파전류를 필터로 흐르게 한다. 수동형 필터는 고조파 억제에 물론 용량성으로 인하여 역률을 개선하게 된다. 그림5는 캐퍼시터에 직렬로 인덕턴스를 삽입하여 단일동조필터가 되게 한 주파수 특성을 나타낸 것이다. 이 경우 동조 고조파(notch harmonic) h_{notch} 는 다음과 같다.

$$h_{kh} = \sqrt{\frac{X_c}{3X_l}}$$

단일동조필터를 설치하게 되면 동조주파수보다 낮은 주파수에서 직렬공진을 일으킬 수 있으므로 동조주파수는 대상 전력계통에서 나타나는 고조파를 피하는 것이 바람직하다. 만일 발생하는 고조파에 정확히 동조되어 있을 경우 고장에 의해 또는 온도 변화로 캐퍼시턴스나 리액턴스가 변화되어 직렬공진이 고조파로 이동되면 공진 가능성이 높아져 필터가 없을 때보다 더 나쁜 상황이 될 수 있기 때문에 고조파 필터를 발생고조파보다 낮은 주파수에서 동조하게 한다.

4. 고조파 해석 모델

철강산업 전력계통에는 다양한 많은 고조파 발생 설비들이 있으나 여기서는 대표적인 고조파 발생 설비인 전기아크로, 싸이크로컨버터 및 비선형 Mill 부하 고조파 해석 모델을 예시한다.

4.1 제강 전기아크로

그림6은 전기아크로 개요도를 나타낸 것이다.

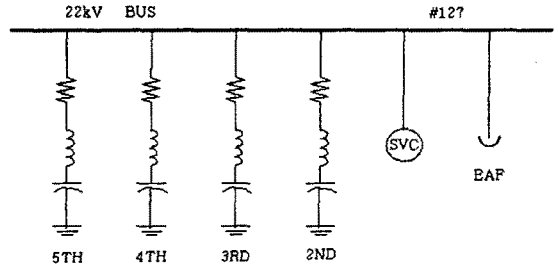


그림6 제강 전기아크로 개요도

전기아크로 운전으로 나타나는 전류는 아크점 지면시간 및 아크의 비선형성 저항 특성 등으로 인하여 파형이 찌그러지고 또한 매우 불규칙하게 변하는 불평형 전류이다. 전기아크로는 운전 상태에 따라 고조파 발생 형태가 다르게 나타난다. 즉, 아크로 변압기 여자시와 아크로 아킹 상태일 때 2가지 경우로 분류할 수 있다. 표 1은 아크로 변압기 여자시 고조파를 나타낸 것이다.

표1 대표적인 아크로 변압기 여자시 고조파

고조파 차수	크기[%]
2	22
3	7
4	5
5	3

아크로는 아킹 상태에 따라 전류가 불규칙하게 변동 및 왜곡되는 정도가 다르다. 용해 초기 단계에는 매우 심하고 용해가 진행되어 정련 상태가 되면서 비교적 안정된 특성을 나타내게 된다. 즉, 아킹 상태에 따라 초기 용해(Early melt), 안정용해(Stable melt) 및 정련용해(Refine melt) 단계로 분류해 볼 수 있다. 표2는 대표적인 아크로 아킹 상태별 고조파 발생량을 나타낸 것이다.

표2 대표적인 아크로 아킹 상태별 고조파

고조파 차수	크기[%]		
	초기용해	안정용해	정련용해
2	11.3	11.0	5.0
3	12.5	5.6	2.8
4	2.0	2.1	1.0
5	12.3	3.7	3.8
6	4.2	1.3	0.7
7	3.5	1.7	0.9
8	2.9	0.6	0.2
9	0.9	0.6	0.2

그림7은 제강 전기아크로 초기 용해 단계 현장 측정 고조파 전류를 이용하여 모의한 것이다. 즉, 전기아크로 운전중 비교적 가혹한 고조파 발생을 모의하였다.

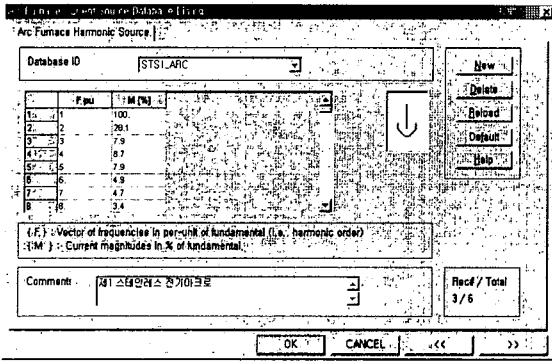


그림7 제강 전기아크로 고조파해석 모델

표 3은 고조파 억제를 위한 수동형 및 능동형 필터의 전기적 특성을 나타낸 것으로 동조 주파수가 발생 가능 고조파 보다 낮은 주파수를 나타내고 있다.

표3 제강 전기아크로 고조파 필터 및 SVC

차수	주파수(Hz)	용량(MVAR)	L(mH)	C(μF)
2	118	17.2	19.29	94.27
3	176	22.1	6.75	121.12
4	234	17.1	4.89	93.72
5	294	23.4	2.29	128.24
SVC	TCR	90	14.76	

4.2 사이크로컨버터

사이크로컨버터에는 2대의 COILER와 1대의 STAND로 이루어져 있으며 여기서 발생하는 고조파는 사이크로컨버터의 운전 주파수에 따라 고조파 형태와 크기가 각각 다르게 나타난다.

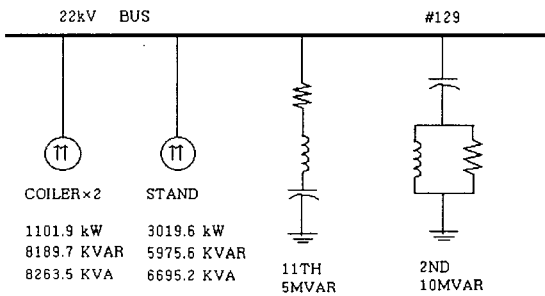


그림8 사이크로컨버터 개요도

표4 Coiler 전류 스펙트럼

고조파(Hz)	고조파 전류(A)	고조파 전류(%)
48	1.547	0.701
54	6.228	2.823
60(기준)	220.585	100.000
66	6.264	2.840
72	1.528	0.693
660	17.318	7.851
780	12.538	5.684
1380	5.009	2.271
1500	3.998	1.812
2100	1.567	0.710
2220	1.250	0.567

여기서는 상대적으로 고조파 발생이 많은 경우를 가정하여 이들 전류 스펙트럼을 이용하여 각각의 고조파 해석 모델을 모의한다. 표4와 표5는 사이크로컨버터 제작자 측으로부터 제시된 고조파 함유 전류 스펙트럼이고 그림9와 그림10은 이들 전류 스펙트럼을 이용한 각각의 고조파 해석 모델을 나타낸 것이다.

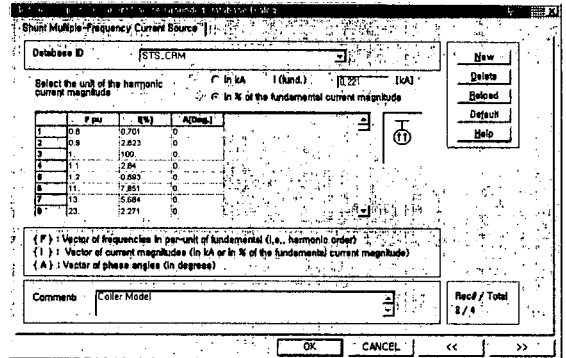


그림9 COILER 고조파해석 모델

표5 Stand 전류 스펙트럼

고조파(Hz)	고조파 전류(A)	고조파 전류(%)
30	5.258	2.955
60(기준)	177.916	100.000
90	5.333	2.998
120	1.159	0.651
630	4.273	2.401
660	6.679	3.754
690	3.943	2.216
750	3.221	1.811
780	4.451	2.502
810	3.472	1.952
1320	1.417	0.797
1350	2.029	1.141
1380	1.886	1.060
1410	1.666	0.936
1440	2.126	1.195
1470	1.584	0.890
1500	1.394	0.784
1530	1.574	0.885
1560	1.431	0.804
2130	1.102	0.619
2160	1.313	0.738

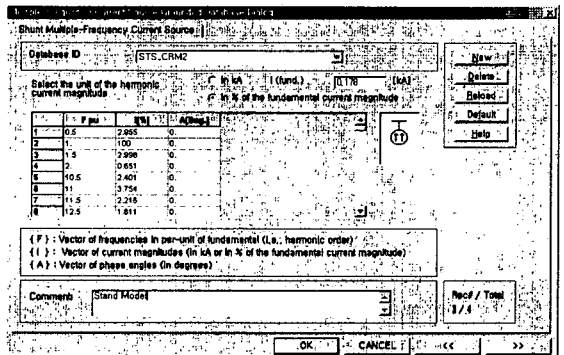


그림10 STAND 고조파해석 모델

표 6은 사이크로컨버터 고조파 억제를 위한 수동형 필터의 전기적 특성을 나타낸 것이다.

표6 사이크로컨버터 필터

차수	주파수 [Hz]	용량 [MVAR]	L [mH]	C [μ F]	저항 [Ω]	비고
2	120	10	49.19	143.04 58.81	382	C-TYPE
11	660	5	2.14	27.18	0.44	

4.3 선재 Mill

철강산업 전력계통에는 많은 대용량 Mill 부하가 있다. 다음은 선재 Mill 부하 고조파 해석 모델을 예시한 것이다.

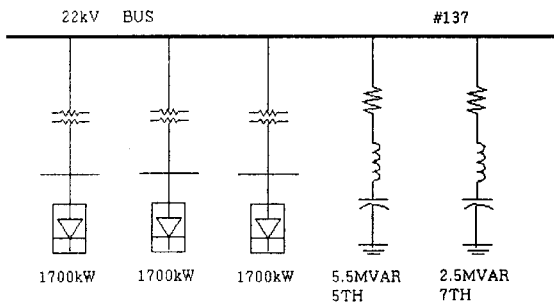


그림11 선재 Mill 개요도

선재 Mill은 그림12와 같은 6펄스 컨버터 형태의 고조파 발생원 3대가 운전되는 것으로 모의한다.

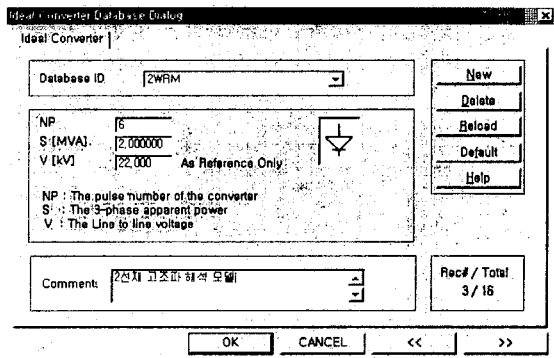


그림12 선재 Mill 고조파 해석 모델

표 7은 선재 Mill 부하 고조파 억제를 위한 수동형 필터의 전기적 특성을 나타낸 것이다.

표7 선재 필터

차수	주파수 [Hz]	용량 [MVAR]	L [mH]	C [μ F]	저항 [Ω]	비고
5	300	5.5	9.34	30.14	1.76	
7	420	2.5	10.48	13.70	2.77	

5. 고조파 해석 결과

고조파 해석 결과 중요 154kV 모선 전압고조파왜형율은 표8과 같다. 여기에 나타난 것과 같이 상대적으로 고조파 발생 설비가 많이 운전되고 있는 압연변전소와

수전변전소 고조파 왜형율이 각각 1.44%와 1.43%로 다른 154kV 변전소에 비하여 상대적으로 고조파 함유율이 많다. 고조파 함유율 규제점인 한국전력과의 접속점 154kV 전압고조파왜형율은 1.28%로서 한국전력 기준치 1.5% (또는 IEEE 519 규격치인 1.5%) 이하로 정상 전력품질 상태를 보여준다.

표8 중요 154kV 모선 전압고조파왜형율 [단위:%]

변전소	모선 번호	전압고조파왜형율	비고
수 전	101, 102	1.43	
압 연	201, 202	1.44	
제 강	301, 302, 303	1.41	
개 폐 소	401, 402	1.40	
제 선	501, 502	1.39	
해 안	701, 702	1.37	
한전과접속점	90	1.28	

그림13과 그림 14는 각각 수전변전소 154kV 모선 전압과 한전접속점 154kV 전압 스펙트럼을 나타낸 것으로 선간 전압이 아닌 상전압을 나타낸 것이다.

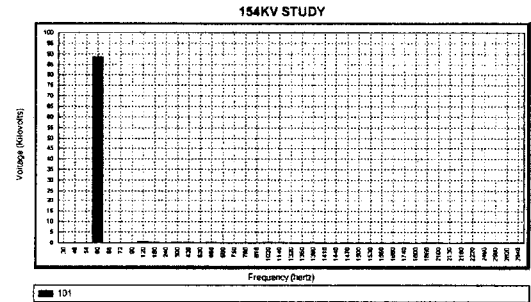


그림13 수전변전소 154kV 모선 전압 스펙트럼

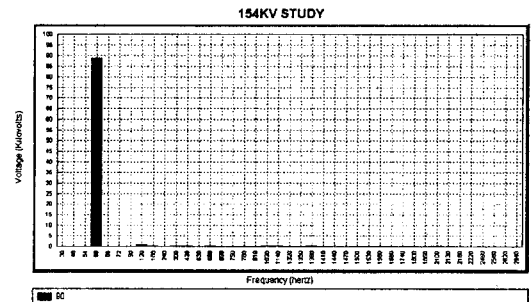


그림14 한전과 접속점 154kV 전압 스펙트럼

표9는 고조파 해석 결과 중요 154kV 선로 전류고조파왜형율을 나타낸 것이다.

표9 중요 154kV 모선 전류고조파왜형율 [단위:%]

선로	관련변전소	전류고조파왜형율	비고
102-201	수전-압연	12.82	
102-301	수전-제강	8.49	
301-402	제강-개폐소	8.21	
201-501	압연-제선	7.02	
401-501	개폐소-제선	9.83	
501-701	제선-해안	3.81	
90-93	한전과접속점	2.14	

여기에 나타난 것과 같이 수전변전소와 압연변전소 간의 송전선로 전류고조파왜형율이 12.82%로 다른 선로에 비하여 상대적으로 많은 고조파 전류를 함유하고 있는 것으로 나타났다. 이는 고조파 발생 설비 대부분이 수전변전소와 압연변전소에 집중되어 있기 때문이다.

IEEE 519에서 전력계통접속점(Point of common coupling)에서 전류고조파 대 최대수요 전류비인 I_{SC}/I_L 크기에 따라 고조파전류 함유율이 제한된다. 검토 대상 3상단락 고장전류는 154kV 차단기 차단 내력인 8402MVA (31.5kA)로 가정하고 최대 수요전력은 290MVA로 가정하면

$$\frac{I_{SC}}{I_L} = \frac{\text{단락용량}}{\text{최대수요전력}} = \frac{8402}{290} = 28.97 \quad 2$$

이때 Demand Distortion은 규격에서 4%이하로 제한된다. 고조파 해석 결과 전력계통접속점 전류고조파함유율은 2.14%로 제한치 범위 내에 들게된다.

그림15와 그림16은 각각 수전변전소와 압연변전소간 154kV 송전선 전류와 한전과 접속점 154kV 전류 스펙트럼을 나타낸 것이다.

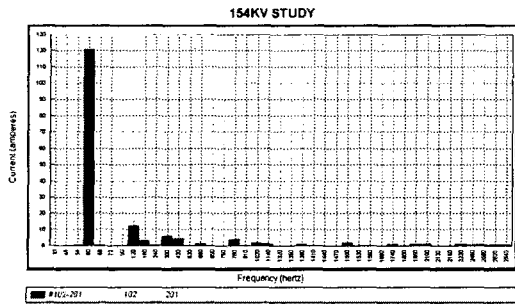


그림15 수전-압연S/S간 154kV송전선 전류 스펙트럼

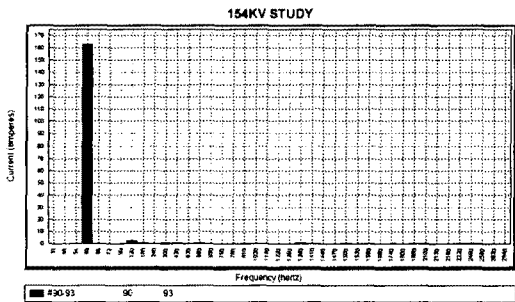


그림16 한전과 접속점 154kV 전류 스펙트럼

6. 공진 대책

전력계통의 역률 보상을 콘덴서뱅크 또는 고조파 억제 필터용 콘덴서를 설치하게 되면 기존의 유도성 리액턴스와 작용하여 공진 가능성이 나타나게 된다. 유도성-용량성 공진에는 직렬공진과 병렬공진 2가지가 있다. 그림17과 그림18은 직렬공진 개요를 나타낸 것으로 공진주파수에서 등가 직렬임피던스가 저항분까지 감소되는 것이다. 만일 저항이 매우 작을 경우 공진에 해당하는 주파수 즉, f_r (Hz) 고조파 전압원이 있게 되면 매우 큰 전류가 직렬 유도성-용량성 회로에 나타나게 된다

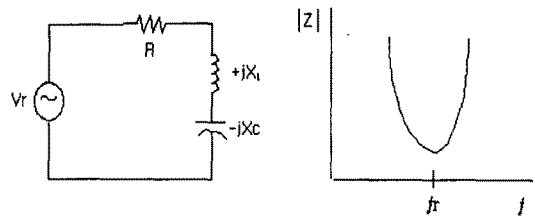


그림17 등가 직렬회로 그림18 주파수 대 임피던스(직렬)

유도성-용량성 회로의 병렬공진은 직렬공진과 유사한 형태로써 해당 주파수 f_r (Hz)에서 유도성리액턴스와 용량성리액턴스가 같게 되는 것이다. 그림19와 그림20은 병렬공진 개요를 나타낸 것이다. 즉, 병렬공진 주파수 f_r (Hz)에서 등가 임피던스가 매우 큰 값을 갖게 되고 해당 주파수 전류원이 있을 경우 순환전류가 병렬 유도성-용량성 회로에 흐르게 되어 매우 큰 전압이 유길 것이다.

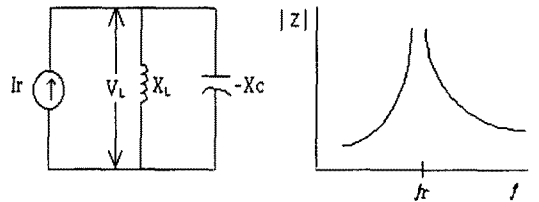


그림19 등가 병렬회로 그림20 주파수 대 임피던스(병렬)

고조파 해석 결과 모의 전력계통은 대부분 고조파 필터에 적정 제동저항(damping resistor)이 포함되어 있어 직렬공진 가능성을 배제하고 있으며 고조파를 억제하기 위한 동조주파수(tuning frequency)를 해당 고조파보다 낮은 주파수로 정하여 직렬공진을 피하도록 하였다. 반면에 병렬공진 가능성은 대부분의 등가 임피던스가 3후판Mill 모션(3PM)과 스테인레스 싸이크로컨버터 모션(STS_CRM)을 제외하고는 모두 50[ohms]이하로 비교적 등가 임피던스 값이 작아 이들 모션을 제외한 다른 모션에서는 병렬공진 가능성이 거의 없다. 3후판Mill모션의 경우 병렬공진이 우려되는 고조파 차수는 8.42~8.43이다. 그러나 8.42~8.43차 고조파 전류원이 유입될 수 없으므로 해당 고조파 병렬공진 발생 가능성은 배제된다.

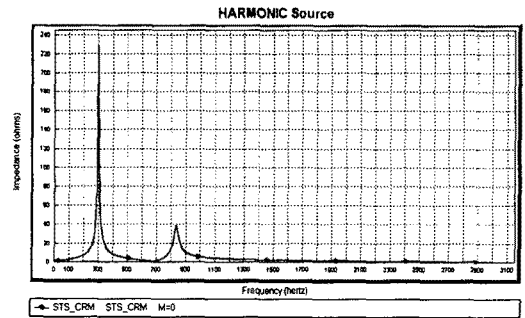


그림21 STS_CRM 모션 주파수 대 임피던스

그림21은 스테인레스 싸이크로컨버터모션 주파수 대 임피던스를 나타낸 것이다. 여기에 나타난 것과 같이 스테인레스 싸이크로컨버터모션의 병렬공진이 우려되는 고조파 차수는 5.02~5.03과 13.87~13.88 2가지 경우가 있으나 13.87~13.88의 경우 해당 고조파 전류원이

없고 등가 임피던스도 40(ohms)이하로 병렬공진 가능성이 없다. 반면에 5.02~5.03차 고조파 병렬공진 가능성은 사이크로컨버터에서 발생하는 5고조파 전류원에 매우 인접하여 이의 병렬공진 가능성이 높은 것으로 판단된다. 따라서 이의 병렬공진 가능성을 배제할 대책 수립이 요망된다. 이와 같은 제5고조파 병렬공진 가능성을 배제할 수 있는 대책은 C-Type 2차 고조파 동조 필터를 계통에 병입 운전하는 방안이 있다.

그림22는 C-TYPE 2차 고조파 동조 필터 운전을 모의한 주파수 대 임피던스를 나타낸 것이다. 이 경우 그래프에서와 같이 공진 가능 주파수가 이동되고, 등가 임피던스도 감소되어 병렬공진의 가능성이 제거된다

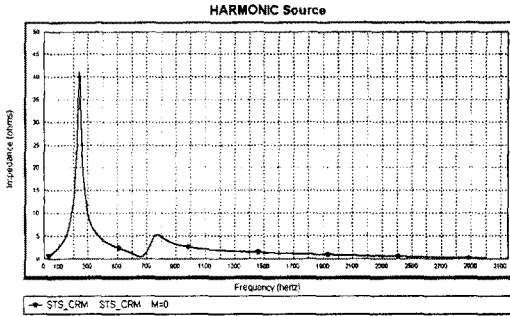


그림22 STS_CRM 모션 병렬공진 대책 수립후 주파수 대 임피던스

7. 결론

철강산업의 전력계통은 많은 대용량 고조파 발생 설비들이 설치되어 운전되고 있어 많은 고조파 전력이 계통 내에 흐르게된다. 고조파 전력은 전력기기 및 전력케이블을 열화 시키고, 개폐장치의 고장을 유발하며 마이크로프로세서 또는 컴퓨터를 구비한 자동제어 설비의 오동작 및 부동작 우려를 증대시키고 있다. 따라서 철강산업 전력계통 신설, 증설 또는 변경시에는 사전에 고조파 상정 해석을 수행하여 필요한 경우 고조파를 억제할 수 있는 대책이 수립되어야 한다. 본 논문은 철강산업 전력계통 고조파를 해석한 사례를 제시하였다.

(참 고 문 헌)

- (1) 오동환, 이강완, 장길수 "실측치에 의한 전기아크로 고조파 해석 모델 개발" 2001년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, P298-301, 대한전기학회, 2001.7.18-20
- (2) 이강완 "전력계통 해석" 전력기술인, 전력기술인협회, 통권218회, P37-40, 2000년 10월호
- (3) "PSAF for Windows User's Guide and Reference Manual" CYME International Inc., March 2001
- (4) S.Ashmore "Power Compensation of AC & DC EAF" Electric Furnace Conference Proceedings 1993
- (5) Richard F. Dudley "Special Design Consideration for Filter Banks in Arc Furnace Installtions" IEEE Trans.ind.Applicat.vol33 no.1 1997