

전철 급전계통의 고조파 실측 및 해석결과 비교검증

최홍관 윤재영
한국전기연구소

이종우 오광해
한국철도기술연구원

Harmonics Analysis in electric railroad feed system

H.K. Choi J.Y. Yoon
KERI

J.W. Lee K.H. Oh
KRRI

Abstract - This paper compares the measurement values of harmonics to the analysis results in railroads testing system. Therefore, in this paper, new program to calculate THD(Total Harmonic Distortion) and measuring system of harmonics are developed. The harmonic measurement point is PCC(Point of Common Coupling), the primary side(154kV) of scott transformer, and the analysis is performed based on real KEPCO system data. As a result of this study, it is possible to present basic data and informations about harmonic problems which can be occurred in the future commercial railroad systems.

345kV 변전소의 154kV 모선 측으로부터 수전 받고 있다. 따라서, 고속전철 급전변전소 주변을 대상으로 하여 고조파 해석대상 계통을 단선도로 표현하면 그림 2.1과 같다.

일반적으로 계통내의 특정 수용가에서 발생하는 고조파는 인근 지역에 큰 영향을 미치며, 거리가 멀어질 수록 그 파급영향은 적어지게 된다. 따라서, 한전 실 계통의 고조파를 해석할 때 고조파 유출원에서 몇 단까지의 변전소까지 상세 모의할 것인지는 경우에 따라서 달라지게 된다. 본 연구에서는 예비해석을 통하여 그림 2.1에서와 같이 우선적으로 급전변전소에서 2단까지의 변전소를 상세 모의하고 그 후단은 Thevenin 방식을 사용하여 등가 축약하는 방식을 선택하였다. 그림 2.1에서 대칭 154kV 변전소는 실제 수력 발전소가 연결된 모선이지만, 나머지 전원은 계통 축약을 위하여 해당 지점에서 한전계통을 바라다 본 Thevenin 등가 임피던스와 등가전원으로 표현한 것이다.

1. 서 론

본 논문의 목적은 전철 급전계통에서 누출되는 고조파가 송전계통에 미치는 파급정도를 파악하고 급전계통의 고조파 실측결과 및 해석결과를 상호 비교, 분석하는데 있다. 본 논문에서 검토한 고조파 해석의 대상계통인 한전계통 구성상태, 고조파 해석조건 및 해석결과를 정리하여 기술하면 다음과 같다.

2. 고조파 분석

2.1 분석 기준

실측결과와 분석기준이 되는 국내 고조파 관리규정을 나타내면 표 3.1.1과 같다. 표 3.1.1은 송전계통에 접속되는 일반 및 특수 수용가의 고조파관리를 위하여 한국전력공사에서 시행하고 있는 관리규정인 영업업무 처리지침 (1990. 7. 1)을 나타낸 것이다. 표 3.1.1에서 알 수 있듯이 154kV 계통에 접속하는 모든 전력 수용가는 해당 접속점 (PCC : Point of Common Coupling)에서의 고조파 왜형률(THD: Total Harmonic Distortion)이 1.5% 이내로 관리되도록 규제하고 있으며, 차수별 왜형률은 별도로 규정되어 있지 않다.

표 3.1.1 한전 고조파 관리규정

항목	지중선로가 있는 S/S에서 공급하는 수용		가공선로만 있는 S/S에서 공급하는 수용	
	전압왜형률 (%)	등가방해전류 (A)	전압왜형률 (%)	등가방해전류 (A)
66kV이하	3	-	3	-
154kV이상	1.5	3.8	1.5	-

2.2 분석 대상

그림 2.1에 나타낸 것과 같은 전철 시험선로에 전력을 공급하는 급전변전소 주변의 한전 실 계통을 해석대상 계통으로 선정해야 한다. 시험선로 급전변전소는 신청원

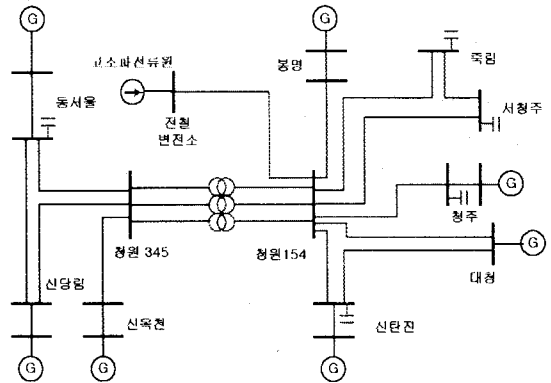


그림 2.1 고조파 해석대상 계통

2.3 분석 대상계통의 데이터

그림 2.1의 해석대상 계통에서 고조파 해석을 시행하기 위하여 적용한 계통 데이터를 기술하면 다음과 같다.

2.3.1 송전선로 데이터

그림 2.1의 해석대상 계통에 나타나 있는 송전선로 임피던스는 표 2.1과 같다. 표 2.1의 데이터는 한전 실 계통 데이터로서 회선당 임피던스, 어드미턴스, 선종 및 공장을 나타낸 것이다.

2.3.2 변압기 임피던스

그림 2.1에서 정원 345kV 변전소의 345/154/23kV 변압기는 단상 3권선 단권 변압기로서 기본 데이터를 기술하면 표 2.2와 같다.

표 2.1 송전선로 임피던스

전압	선로명	회선	정상분 임피던스 (Z1)		자기임피던스 (Zs)		선종
			%R	%X	%R	%X	
345 kV	청원-동서울	2	3.552	3.8449	1.6716	9.3526	ACSR 480*4B
	청원-신옥천	2	0.0954	1.0324	0.4488	2.5112	ACSR 480*4B
154 kV	청원-봉명	2	3.512	2.7878	1.9086	8.4689	ACSR 410*2B
	청원-청주	1	8.351	4.8555	2.8634	12.4476	ACSR 410*2B
		1	0.361	1.966	2.8634	12.4476	ACSR 410
	청원-신탄진	1	6.778	2.8100	1.8525	7.4237	ACSR 410
		1	6.778	2.8100	1.8525	7.4237	ACSR 240
		1	6.778	2.8100	1.8525	7.4237	ACSR 330
	청원-대청	1	5.369	2.2719	1.4494	5.9250	ACSR 410
		1	5.369	2.2719	1.4494	5.9250	ACSR 240
	대청-신탄진	1	3.710	1.3646	0.9198	3.7195	ACSR 240
	청원-서청주	2	1.665	1.3079	0.8568	4.0056	ACSR 330

표 2.2 청원 345kV 변압기 정수

항 목	정 격 치	비 고
정격전압(kV)	362/170	
용량(MVA)	500(166.7*3)	
%Z(%)	10.0	500(MVA) 기준
결선방식	Y-Y	

2.3.3 대청수력 발전기 임피던스

대청 154kV 모선에 연결된 대청 수력 발전소의 발전기 동기임피던스 및 승압 변압기(step-up transformer)의 누설임피던스를 나타내면 표 2.3과 같다.

표 2.3 대청수력 및 승압변압기 임피던스

항 목	정 격 치	비 고
대청수력 동기임피던스 Xd(%)	0.258	50(MVA) 기준
승압변압기 %Z(%)	0.11	100(MVA) 기준

2.3.4 등가축약 임피던스

그림 2.1에서 고속전철 급전변전소로부터 2단 이상 떨어진 외곽 변전소에서의 등가축약 임피던스는 3상/1상 단락용량 해석결과로부터 아래와 같은 식에서 역으로 계산할 수 있다.

$$S_{3F} = \sqrt{3} * V_1 * I_{3F} \quad (2.1)$$

$$S_{1F} = \sqrt{3} * V_1 * I_{1F} \quad (2.2)$$

$$I_{3F} = \frac{\sqrt{3} * V_1}{3 * (Z_1 + Z_F)} \quad (2.3)$$

$$I_{1F} = \frac{\sqrt{3} * V_1}{(Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_F)} \quad (2.4)$$

여기서, S_{3F}, S_{1F} : 3상 단락용량 및 단상 지락용량

I_{3F}, I_{1F} : 3상 및 단상 고장전류

V_1 : 고장 이전 해당 모선의 정상상태 전압 (조류계산 결과)

Z_F : 해당모선의 단락 혹은 지락 임피던스

Z_0, Z_1, Z_2 : 고장 모선에서 계통을 바라본 대칭성분 등가축약 임피던스

한전 계통의 각 모선별 단락용량은 시점에 따라서 변화되며, 계통의 확장에 따라서 증가되는 추세이다. 따라서 본 연구에서는 각 모선별로 기본 단락용량을 표 2.4와 같이 선정하고 이를 변화시키면서 고조파의 추이를 고찰하여 보았다. 표 2.4에 나타낸 모선 등가 임피던스는 위의 식 (2.1)~(2.4)를 사용하여 구한 것이다. 단, 고조파 해석은 기본적으로 단상해석을 전제로 한 것이기 때문에 표 2.4에서는 정상분 임피던스(Z_1)만을 나타내었다.

표 2.3 각 모선별 등가 임피던스

모선명	정상임피던스(Z1)		3상단락		1선지락	
	최대조건	최소조건	MVA	위상(°)	MVA	위상(°)
동서울	0.031+j0.496	0.034+j0.581	20122.03	-86.4	16818.7	-84
동서울1	0.038+j0.821	0.041+j0.903	12167.24	-87.3	11958.7	-86.2
서청주	0.174+j1.788	1.224+j7.259	5566.54	-84.4	3988.45	-82.1
청주	0.335+j2.595	0.177+j1.846	3821.85	-82.6	2367.59	-79.4
청원	0.055+j0.684	1.993+j10.387	14572.85	-85.4	11072.4	-83.7
청원#1	0.092+j1.130	0.056+j0.728	8820.37	-85.3	8296.32	-84.9
봉명	0.201+j1.907	0.253+j2.289	5214.95	-84	3282.26	-81.4
대청H/P	0.325+j1.928	1.095+j6.937	5114.56	-80.4	4122.37	-81
신옥천	0.034+j0.481	0.034+j0.517	20738.28	-86	16658.9	-84
신옥천1	0.058+j0.797	0.058+j0.835	12513.96	-85.8	11755.9	-85.2
신탄진#1	0.252+j1.558	0.265+j1.665	6336.14	-80.8	4260.32	-79.4

2.3.5 조상설비

그림 2.1의 해석 대상 계통에서 각 변전소별 조상설비 용량을 나타내면 표 2.5와 같다.

표 2.5 변전소별 조상설비

Bus Number	Bus Name	Capacity(MVAR)
16	동서울	-94.4
2	청주	-71.2
3	서청주	-20.4
7	신탄진	-20.3

2.4 고조파 분석

2.4.1 고조파 실측 결과

위에서 기술한 계통에서의 실측결과의 한 예를 나타내면 다음 그림 2.2와 같다. 전체적으로 급전변전소 1차측 154kV단에서의 고조파 전압 왜형률(THD)이 0.9%를 나타내고 있다.

```

*****
POWERPROFILER SITE Feb 22 2000 (Tue)
HARMONICS SNAPSHOT 3:04:11 PM
Fundamental freq: 60.0 Hz
VOLTAGE THD 0.9% THD avs
Phase A-N Volts: 0.9% THD
Phase B-N Volts: 1.0% THD
Phase C-N Volts: 0.8% THD
CURRENT THD 44.5% THD avs
Phase A Current: 42.7% THD
Phase B Current: 45.7% THD
Phase C Current: 47.1% THD
Neutral Current: 84.1% THD
    
```

그림 2.2 고조파 실측결과

2.4.2 고조파 해석 결과 비교 분석

자체 개발한 프로그램을 이용하여 그림 2.1과 같은 전철 변전소 부근의 전력계통을 모의하고 고조파 전류원을 주입하여 고조파해석을 시행하였으며, 계산되어진 급전 변전소 154kV 모선의 전압왜형률을 실측결과와 비교 분석하였다.

표 2.6 기본 조류해석 결과

No.	V(pu)	Angle	Pg(MW)	Qg(MVar)	Pl(MW)	Ql(MVar)
신옥천	0.978	-22.55	0	-	21.7	12.7
신옥천0	0.978	-22.55	1268.0	22.6	0	0
동서울	0.971	-34.52	-	-	0	0
동서울0	0.971	-34.52	-	75.3	553.0	0
청원3	0.971	-26.35	0	-	0	0
청원0	0.971	-29.72	144.2	112.6	0	0
청원	1.014	-29.72	0	-	51.0	23.2
전철	1.000	0	0	-	0	0
봉명	0.991	-33.15	0	-	292.0	133.0
봉명0	0.991	-33.15	0	39.8	161.8	0
서청주	1.090	-30.27	0	-	130.0	59.2
청주	1.008	-32.61	0	-	117.0	53.3
청주0	1.008	-32.61	0	-	90.0	0
신탄진	1.007	-29.65	0	-	64.0	29.2
신탄진0	1.007	-29.65	32.8	-	0	58.0
대청HP	1.013	-29.51	45.0	-35.	0	0

급전변전소에 적용한 고조파 전류원은 실측결과를 적용한 것으로서 해석시에 적용한 고조파 전류원의 기본값은 실제 측정된 A상 고조파 전류원 크기를 적용하였으며, 이를 활용하여 각 모선단 고조파 전압왜형률을 해석하였다. 이와 같은 기본 케이스에 대한 고속전철 급전변전소를 비롯한 각 모선단의 전압왜형률(THD : Total Harmonic Distortion)을 나타내면 표 2.7와 같다.

표 2.7 고조파 해석결과 각 모선단 전압왜형률(THD)
(6번 모선이 고속전철 급전변전소)

Bus No.	Bus Name	THD (V)
0	대청H/P	0.596
1	청주모선등가	0.249
2	청주	0.264
3	서청주	0.463
4	청원	0.380
5	청원345	0.179
6	전철급전	0.911
7	신탄진	0.743
8	신탄진등가	0.906
9	죽림	0.421
10	봉명	0.330
11	봉명등가	0.310
12	신옥천	0.176
13	신옥천등가	0.173
14	신당진	0.174
15	신당진등가	0.167
16	동서울	0.254
17	동서울등가	0.250

표 2.7에 나타낸 해석결과와 앞에서 기술한 실측결과를 상호 비교하면 다음과 같다. 즉, 실측결과는 a상, b상, c상 고조파 전압왜형률(THD)이 각각 0.9%, 1.0%, 0.8%로서 평균 0.90% 이었는데, 해석결과로 구해진 급전변전소의 전압왜형률은 0.911%로 나타났다. 이와 같은 차이는 한전 실제계통을 2단 이후에서 등가축약 하였으며, 실측시의 계통운전 상태와 해석시의 초기 조건이 약간 다르기 때문으로서 실측결과에 상당히

근접한 값이라고 할 수 있다.

현실적으로 계통운전 조건이 변경되면 위의 해석결과도 달라질 것이며, 특히 향후 각 변전소의 단락용량 증대도 예상된다. 따라서, 운전조건의 변화에 따른 전압왜형률의 변화추이를 간략하게 살펴보았는데 전체적인 해석결과를 나타내면 표 2.8과 같다. 표 2.8에서 단락용량의 감소는 주변계통 선로개방 등과 같은 현 시점에서의 운전조건 변화를 모의한 것으로 생각할 수 있으며, 반대로 단락용량 증대는 향후 계통규모의 확장에 따른 자연스러운 현상을 반영한 것이다.

표 2.8의 해석결과를 살펴보면 단락용량의 증가 혹은 감소에 따라서 각 모선단의 전압왜형률은 달라진다. 하지만, 모선에 따라서 그 형태는 서로 다르며, 일괄적으로 비례 혹은 반비례한다고 할 수 없다. 이는 각 모선의 위치에 따라서 계통을 바라보는 등가 임피던스가 서로 다르며 그 결과로 고조파 전압이 상호 중첩되어 나타나기 때문이다. 향후 계통운전 조건의 변화에 따른 고조파의 변경에 대하여는 더욱 자세한 검토가 필요할 것으로 생각된다.

표 2.8 급전변전소 주변 전압왜형률 Case study
(등가축약모선의 단락용량 변화시 변전소 전압왜형률)

검토경우	THD			비 고
	BUS-6	BUS-7	BUS-8	
기본케이스	0.911	0.743	0.906	실측결과 비교
C-11	0.962	0.696	0.938	등가축약모선 단락용량 20% 증대
C-12	0.953	0.651	1.164	등가축약모선 단락용량 40% 증대
C-13	0.899	0.769	0.913	등가축약모선 단락용량 10% 감소
C-14	0.889	0.796	0.924	등가축약모선 단락용량 20% 감소

3. 결 론

지금까지 고속전철 시험선로에 대한 고조파 실측 및 해석결과와의 비교검증에 대하여 기술하였다. 일반적으로 고속전철 급전계통의 고조파 발생 및 송전계통으로의 유출량은 열차운행 및 계통조건 등에 따라서 상시적으로 변동되기 때문에 향후에도 이와 같은 실측은 계속적으로 시행되어야 할 것으로 생각된다. 또한 이러한 분석은 실제적인 상업 운전시에 대비한 필터설계 등의 고조파 대책방안을 지속적으로 검토할 필요성이 있을 때 유용한 참고자료가 될 수 있을 것으로 생각된다.

(참 고 문 헌)

- [1] IEC 1000-3-6, 1996 "Assessment of emission limits for distorting loads in MV and Hv power systems-basic EMC publication" 1996-10
- [2] 일본전기협동연구회, "전력계통에서의 고조파와 그 대책", 1990. 6.(4)
- [3] IEC 555-2, "Part2:Harmonics", 1982.
- [4] 한국전력공사 영입처, "영업 업무처리 지침 제 4절 (고조파)", 1990. 7.
- [5] 전기공급규정, 한국전력공사, 1996
- [6] 특수수용의 공급조건에 관한 연구, 한국전력공사-한국전 기연구소, 1997. 1
- [7] 한국전기연구소, 경부고속전철용 전력공급의 비용절감 방안연구 1992.10
- [8] P. Roccia, N. Quillon, "Harmonics in industrial networks", E/CT 152, 1994. 10
- [9] 富下一雄, "전기철도 공학연습", 1976. 5
- [10] MATLAB Manual, 1999. 10