

배전계통의 VTHD레벨 제시를 위한 최적측정위치 선정

박희철 조남훈  
전력연구원 전력연구원

Optimal Measurement Placement for VTHD level presentation in Distribution Systems

Hee-chul Park Num-hun Cho  
KEPRI KEPRI

**Abstract** - This paper presents the optimal point for measuring harmonic levels in distribution systems. Harmonic should be measure PCC ( Point of Common Coupling ), where is extended over distribution systems, but some PCCs are limited for economical and technical reason : for this reason, the harmonic measurement for a real distribution system and computer simulation are performed to find the optimal PCC in this paper.

1. 서 론

최근에 급속한 기술 혁신과 정밀기계의 증대로 인한 비선형 부하가 심화되고 있다. 이로 인해 비선형 기기로부터 발생하는 고조파가 전력품질을 악화시키고 있는 실정이다. 따라서 사회적인 신뢰성과 공공성을 획득할 수 있는 배전계통의 고조파 관리 기준안이 필요하다. 고조파 관리 기준안을 적용시키기 위해서는 배전계통의 각 지점에 대해 고조파 레벨을 정확히 파악해야 한다. 각 지점의 측정결과가 관리 기준치를 초과하는 경우에는 고조파에 대한 대책을 마련해야 하기 때문이다. 배전계통의 고조파 레벨을 가장 정확히 알 수 있는 방법은 공통 결합점(Point of Common Coupling : PCC)에서 측정하는 것이다. 그러나 배전선로에서 측정이 불가능한 경우도 있고 측정에 따른 경제적인 이유로 많은 곳을 측정할 수 없는 애로 사항도 발생한다. 따라서 고조파 레벨을 제시하기 위해 가장 적절한 측정위치를 선정하는 것이 매우 중요하다.

2. 본 론

2.1 고조파 전달특성

고조파 전달특성은 계통의 임피던스와 각 모선에 유입되는 고조파 전류의 크기로부터 Kirchhoff 법칙을 적용하여 얻을 수 있다[1,2]. 고조파 전류원이 주어지면 주입되는 모선에서 계통의 Thevenin 등가 임피던스로부터 그 지점의 고조파 전압을 구할 수 있다. 그리고 인접 모선으로 흐르는 고조파 전류를 구하고 다시 Thevenin 임피던스를 곱하면 인접모선의 고조파 전압을 구할 수 있다. 이러한 방법을 반복하면 모든 모선의 고조파 전압을 구할 수 있다.

먼저 Thevenin 등가회로를 구하기 위해서는 각 모선의 부하를 등가임피던스로 바꾸어야 한다. 등가임피던스는 같은 전력을 소모하는 R-L 직렬회로라고 한다면,

$$R \pm j\omega L = \frac{|V|^2}{P \mp jQ} \quad (1)$$

식 1로부터 n차 고조파 등가임피던스는  $R \pm jn\omega L$  로 나타낼 수 있다. 각 고조파에 대해 부하와 선로의 임피던스가 주어지면 각 모선에서 본 Thevenin 등가임피던스에 의해 직·병렬회로의 임피던스로 간주하여 값을 구

할 수 있다. 예를 들어 설명하면,

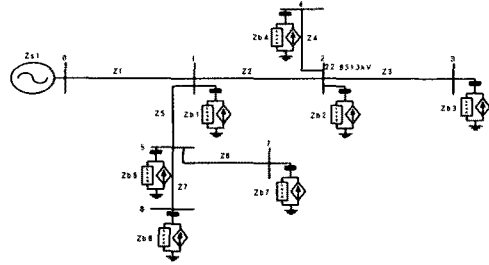


그림 1. 대상 계통도

여기서  $Z_s$ 는 전원임피던스,  $Z_1, Z_2, \dots, Z_7$ 은 선로임피던스,  $Z_{b1}, Z_{b2}, \dots, Z_{b7}$ 은 각 모선의 임피던스이다.

먼저 말단측 방향에서부터 등가임피던스를 구한다. 말단 방향의 임피던스를  $Z_{r1}, Z_{r2}, \dots, Z_{r7}$ 이라 한다. 말단 선로이 경우 등가임피던스는 모선 부하임피던스와 선로 임피던스의 직렬연결이 된다.

$$Z_{r3} = Z_3 + Z_{b3} \quad Z_{r4} = Z_4 + Z_{b4}$$

$$Z_{r6} = Z_6 + Z_{b6} \quad Z_{r7} = Z_7 + Z_{b7}$$

말단측 선로의 등가임피던스와 부하임피던스를 병렬로 합한 후 선로임피던스에 직렬로 합한다.

$$Z_{r2} = (Z_{b2} // Z_{r3} // Z_{r4}) + Z_2$$

$$Z_{r5} = (Z_{b5} // Z_{r6} // Z_{r7}) + Z_5$$

$$Z_{r1} = (Z_{b1} // Z_{r2} // Z_{r5}) + Z_1$$

두 번째 전원측 방향으로부터 등가임피던스를 구한다. 전원 방향의 임피던스를  $Z_{s1}, Z_{s2}, \dots, Z_{s7}$ 이라 한다. 전원측 방향의 경우 등가임피던스는 분기되지 않은 경우에 자신의 임피던스와 선로임피던스를 직렬로 합한것이다.

$$Z_{s1} = Z_s + Z_1$$

분기가 되는 경우에는 말단측 방향임피던스와 전원측 방향 임피던스 그리고 부하임피던스의 병렬로 합한것이다.

$$Z_{s2} = (Z_{b1} // Z_{s1} // Z_{r5}) + Z_2$$

$$Z_{s5} = (Z_{b1} // Z_{s1} // Z_{r2}) + Z_5$$

$$Z_{s3} = (Z_{b2} // Z_{s2} // Z_{r4}) + Z_3$$

$$Z_{s4} = (Z_{b2} // Z_{s2} // Z_{r3}) + Z_4$$

$$Z_{s6} = (Z_{b5} // Z_{s5} // Z_{r7}) + Z_6$$

$$Z_{s7} = (Z_{b5} // Z_{s5} // Z_{r6}) + Z_7$$

Thevenin 임피던스는 전원방향의 등가임피던스와 말단측 등가임피던스 및 모선의 부하임피던스로 구한다. Thevenin 임피던스를  $Z_{t1}, Z_{t2}, \dots, Z_{t7}$ 이라 한다.

$$\begin{aligned}
 Zt1 &= Zb1 // Zs1 // Zr2 // Zr5 \\
 Zt2 &= Zb2 // Zs2 // Zr3 // Zr4 \\
 Zt3 &= Zb3 // Zs3 \\
 Zt4 &= Zb4 // Zs4 \\
 Zt5 &= Zb5 // Zs5 // Zr6 // Zr7 \\
 Zt6 &= Zb6 // Zs6 \\
 Zt7 &= Zb7 // Zs7
 \end{aligned}$$

이상으로 계통에서의 Thevenin 임피던스를 구하였다. 그림2의 예계통을 통해 조파 전달특성을 설명한다.

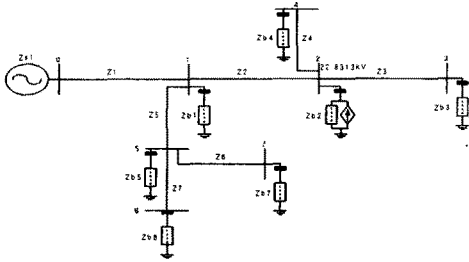


그림 2. 전달특성 계통도

여기서 2번 모선에 I라는 고조파 전류가 주입되었다고 가정한다. 고조파 전류가 주입된 2번 모선의 고조파 전압을 구하면,

$$V2 = Zt2 \times I$$

2번 모선의 고조파 전압으로부터 인접모선으로 유입되는 고조파전류를 구하면,

$$I21 = \frac{V2}{Z2} \quad I23 = \frac{V2}{Zr2} \quad I24 = \frac{V2}{Zr4}$$

나머지 부분은 위와 동일하게 전압법칙을 적용하면

$$\begin{aligned}
 V1 &= (Zb1 // Zs1 // Zr5) \times I21 \\
 V3 &= Zb3 \times I23 \quad V4 = Zb4 \times I24 \\
 V0 &= Zs \times I10 \\
 V5 &= (Zb5 // Zr6 // Zr7) \times I15 \\
 V6 &= Zb6 \times I16 \quad V7 = Zb7 \times I17
 \end{aligned}$$

이상으로 한 고조파 성분으로인해 각 모선의 고조파 전압을 알아보았다. 여러개의 고조파가 발생한다면 각각에 대해 위와 같은 과정을 반복하여 중첩의 정리를 이용하면 각 모선의 고조파전압을 구할 수 있다.

### 2.2 VTHD레벨 제시를 위한 국내 배전계통측정

실제 국내 배전계통의 측정위치에 따른 VTHD레벨을 분석하기 위해 대전의 배전계통을 측정하였다. 측정장소는 변전소 MTR 2차측과 각 Feeder의 부하 변압기 1차측인 고압부분을 측정하여 비교하였다. 변전소의 MTR은 154/22.9kV, 45/60MVA의 용량을 가지고 있다. 측정시점은 변전소의 STATCON의 Bank를 투입 전과 투입 후를 각각 측정하였다. 이러한 이유는 같은 시점에서 VTHD를 비교하기 위해서 측정기의 오차를 감안하여 시행한 것이다. VTHD 측정시 순시치로 항상 데이터를 받기 때문에 신뢰도가 낮아서 6Cycle의 평균치를 사용하였다.

#### 2.2.1 서로 다른 Feeder에서의 VTHD

측정위치는 변전소 MTR 2차측과 H아파트 변압기 1

차측과 E회사의 변압기 1차측에 전력계통 상태 분석장치(Power System Dynamic Monitoring System:PSDM)을 설치하였다.

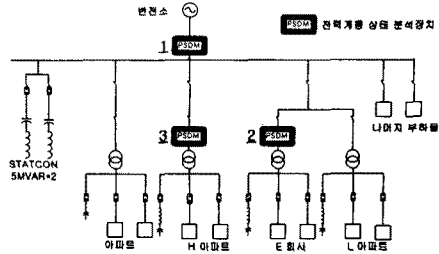
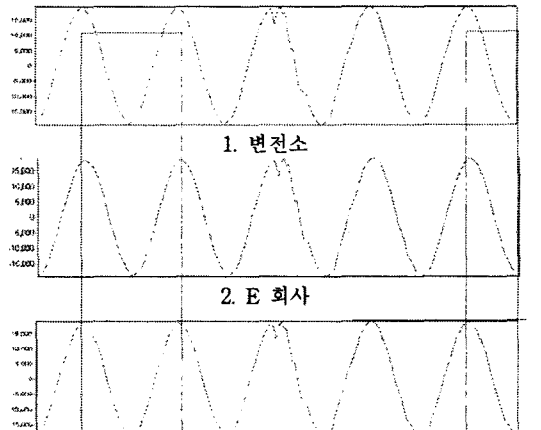


그림 3. 서로 다른 Feeder에서의 측정위치



투입전 1. Cycle < 3. H 아파트 > 투입후 1. Cycle  
그림 4. 측정위치 파형

표 1. 측정위치에 대한 VTHD(단위:%)

	STATCON 투입 전(A상)		STATCON 투입 후(A상)	
	1 Cycle	Average (6 Cycle)	1 Cycle	Average (6 Cycle)
1. 변전소	1.6	1.55	1.55	1.6
2.E 회사	1.4	1.4	1.45	1.43
3.H 아파트	1.5	1.47	1.55	1.47

측정시간 : 측정 첫날 오전 8시 29분대

#### 2.2.2 같은 Feeder에서의 VTHD

측정위치는 변전소 MTR 2차측과 L아파트 변압기 1차측과 E회사의 변압기 1차측에 PSDM을 설치하였다.

표 2. 측정위치에 대한 VTHD(단위:%)

	STATCON 투입 전(A상)		STATCON 투입 후(A상)	
	1 Cycle	Average (6 Cycle)	1 Cycle	Average (6 Cycle)
1. 변전소	1.5	1.43	1.5	1.43
2.E 회사	1.3	1.3	1.4	1.37
3.L 아파트	1.3	1.3	1.4	1.37

측정시간 : 측정 마지막 날 오전 8시 12분대

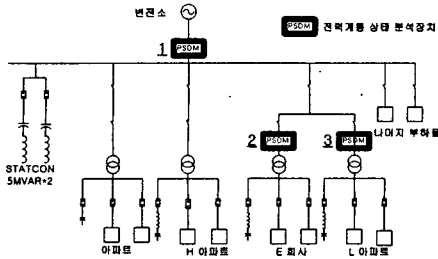


그림 5. 서로 다른 Feeder에서의 측정위치

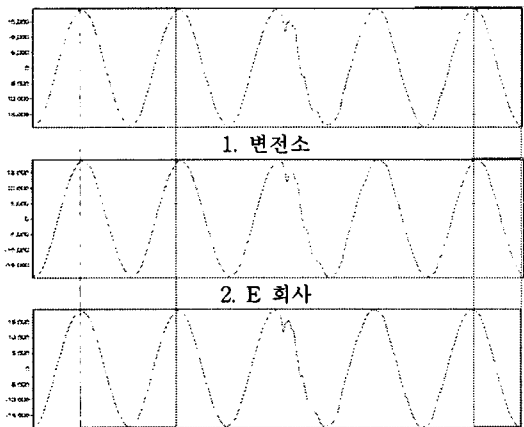


그림 6. 측정위치 파형

측정 결과 고조파 전압은 3차, 5차, 11차의 기수 고조파 성분이 많이 함유되어 있었다. 각 측정위치에 따른 VTHD는 거의 유사하게 나타났다. 그리고 고조파 발생 차수도 그의 일치하게 나타났다.

### 2.3 측정위치에 따른 VTHD 시뮬레이션

PSCAD/EMTDC를 이용해 모의 시뮬레이션을 통한 계통의 측정위치 VTHD크기를 비교하기 위해 그림 7과 같이 모델링을 구성하였다. 이 계통에서 사용된 기준 용량은 100[MVA]이다. 부하는 7개가 존재하고, 부하당 고조파가 3, 5, 7, 9차가 기본파의 전류에 대해 각각 발생한다고 설정했다. 선로의 종류는 ACSR 160<sup>2</sup>mm를 사용하였다. 거리당 %Z는 100[MVA] 기준으로 3.46+j7.46[%/km]로 나타나는데, 이것을 음범으로 고치면, 0.182+j0.371[Ω/km]이다. 역률은 95%이다.

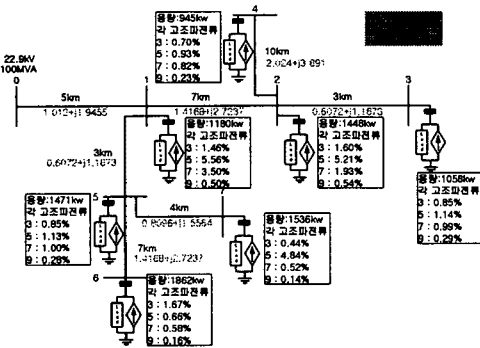


그림 7. 시뮬레이션 계통도

시뮬레이션을 한 결과 표3과 같은 VTHD의 결과가 나왔다. 측정된 데이터와 유사하게 앞쪽 모선과 뒤쪽 모선의 VTHD가 유사하게 나타났다. 그리고 말단 부분의 VTHD가 가장 크게 나타났고, 특히 3번 모선과 4번 모선에서 많이 나타났다.

표 3. 시뮬레이션에 의한 VTHD(단위:%)

모선	0번	1번	2번	3번	4번	5번	6번	7번
VTHD	2.01	2.62	2.95	2.96	2.96	2.73	2.74	2.86

### 3. 결 론

배전계통의 VTHD레벨은 각 지점에 대해 사회적인 신뢰성과 공공성을 획득해야 된다. 그래서 가장 정확한 측정점은 공동 결합점이다. 그러나 이미 설치되어 있는 배전선로에 대해 측정한다는 것은 불가능한 경우이고, 또한 측정에 따른 인력과 측정 장비등과 같은 경제적인 이유로 많은 곳을 측정할 수 없는 경우가 많다.

본 논문에서는 VTHD 레벨제시를 위한 최적측정 위치를 제시하기 위해 실측 및 시뮬레이션에 의해 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다. 고조파 레벨을 제시하기 위해 가장 적절한 측정위치를 배전계통의 전단에 맞춰서 변전소의 모선과 각 배전선로 말단과의 전압 왜형을 관계를 파악하여 변전소 모선에서 전압 왜형률을 관리하는 것이 최적적인 방법이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] M. McGranaghan, et al, "Distribution Feeder Harmonic Study Methodology", IEEE Trans, on PAS, Vol, PAS-103, No. 12, pp. 3663-3671, Mar./Apr. 1984
- [2] T.H.Chen, M.S.Chen, K.J.Hwang, P.Kotas, E.A.Chebli, "Distribution System Power Flow Analysis", IEEE Trans, on PWRD, Vol. 6, No. 3. pp. 1146-1152, July 1991