บทที่ 6

มาตรฐานและการตรวจวัดฮาร์มอนิก

เมื่อมีฮาร์มอนิกเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าในปริมาณที่มาก จะทำให้เกิดผลเสียหายแก่อุปกรณ์ไฟฟ้า โดยเฉพาะกรณีเกิดสภาวะเรโซแนนซ์ขึ้น ซึ่งอาจทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้ารับกระแสหรือแรงดันเกินพิกัดไปมาก ปัญหาเหล่านี้มีความสำคัญมากขึ้นเพราะ ผู้ใช้ไฟฟ้าโดยเฉพาะโรงงานอุตสาหกรรม ได้นำอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกมาใช้จำนวนมากขึ้น ประเทศที่ประสบปัญหาเรื่องนี้ จะมีการวางแผนป้องกันปัญหาเนื่องจากฮาร์มอนิกด้วยการประกาศใช้มาตรฐานทางด้านฮาร์มอนิกขึ้น และมีการปรับปรุงเพื่อให้เหมาะกับสภาวะการณ์ปัจจุบัน เช่น ประเทศสหรัฐอเมริกาประกาศใช้มาตรฐาน IEEE Std.519 ตั้งแต่ปี ค.ศ.1981 และมีการปรับปรุงเรื่อยมา ฉบับที่ใช้ปัจจุบันคือ IEEE Std.519-1992 :IEEE Recommended Practrices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System ประเทศอังกฤษ ประกาศใช้มาตรฐานด้านฮาร์มอนิกตั้งแต่ปี ค.ศ. 1976 และยังคงใช้มาถึงปัจจุบัน ยังไม่มีการปรับปรุง มาตรฐานฉบับดังกล่าวชื่อ Engineering Recommendation G.5/3-1976 : Limits for Harmonics in the United Kingdom Electricity Supply System สำหรับประเทศไทย การไฟฟ้าทั้ง 3 แห่ง (กฟผ. กฟภ. กฟน.)ได้ร่วมกันจัดทำข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม ซึ่งอ้างอิงจากมาตรฐานของประเทศอังกฤษ (G.5/3) สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงมาตรฐานที่เกี่ยวกับฮาร์มอนิกที่เกี่ยวข้องกับระบบอุตสาหกรรม ที่ควรศึกษาดังนี้

6.1 มาตรฐาน IEEE Std.519-1992 [2,9]

เป็นมาตรฐานที่โรงงานอุตสาหกรรม และ บทความที่เกี่ยวกับฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรมหลายบทความกล่าวถึง[5,6,8] สำหรับรายละเอียดในส่วนของค่าจำกัดระดับความผิดเพี้ยนของกระแสหรือแรงดันฮาร์มอนิกนั้น จะทำการประเมินที่จุดต่อร่วม (Point of Common Coupling :PCC) มาตรฐานฉบับนี้ได้แบ่งแนวปฏิบัติออกเป็น 2 แนว คือ

6.1.1 แนวปฏิบัติสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละราย

จะพิจารณากระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากผู้ใช้ไฟฟ้าว่าส่วนที่ป้อนเข้าสู่ระบบว่ามีค่าเท่าใด ด้วยการกำหนดค่าขีดจำกัดกระแสผิดเพี้ยนโดยใช้ดัชนีชี้วัด 2 ตัว คือ ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (Total Demand Distortion :TDD) และ กระแสฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับ (Individual Harmonic Current Distorion :Ih) ค่าจำกัดจะแบ่งตามระดับแรงดัน และขนาดของกระแสลัดวงจร (I_{SC}) ต่อกระแสในช่วงที่มีความต้องการสูงสุด (I_L) ดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ค่าจำกัดของกระแสฮาร์มอนิกตาม IEEE Std.519-1992

$V_n \leq 69$ kV						
I_{SC}/I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
69 kV $< V_n \leq 161$ kV						
< 20*	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20-50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50-100	5.0	2.25	2.0	1.25	0.35	6.0
100-1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0
$V_n > 161$ kV						
< 50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≤ 50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0

**อุปกรณ์ที่ให้กำเนิดกำลังไฟฟ้าจะถูกจำกัดให้อยู่ในค่ากระแสฮาร์มอนิกเหล่านี้ โดยไม่คำนึงถึงค่า I_{SC}/I_L จริง*

หมายเหตุ

- I_{SC} เป็นค่ากระแสลัดวงจรที่จุดต่อร่วม (PCC) ปกติจะใช้กระแสลัดวงจรในกรณีเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟส เพราะถือเป็นกรณีรุนแรงที่สุด
- I_L เป็นค่ากระแสที่วัดในช่วงผู้ใช้ไฟฟ้ามีความต้องการใช้พลังงานสูงสุดในเวลา 15 หรือ 30 นาที แต่ถ้าข้อมูลไม่เพียงพอ I_L คำนวณได้จาก ค่าเฉลี่ยของกระแสคิดย้อนหลังใน

รอบ 1 ปี (คิดจากบิลค่าไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้า) ในกรณีผู้ใช้ไฟฟ้ารายใหม่ จะประมาณกระแส I_L โดยการทำนายลักษณะโหลดล่วงหน้า (Predicted load profiles)

- ค่าในตารางที่ 6.1 เป็นค่าจำกัดของฮาร์มอนิกที่เป็นลำดับคี่ส่วนค่าจำกัดของลำดับคู่จะใช้ค่า เป็นร้อยละ 25 ของค่าจำกัดลำดับคี่ที่อยู่เหนือขึ้นไป เช่น ถ้าพิจารณาฮาร์มอนิกลำดับ ที่ 4 ให้ใช้ค่า ร้อยละ25 ของค่าจำกัดลำดับที่ 5 เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วจะไม่พิจารณาฮาร์มอนิกลำดับคู่ เว้นแต่ว่าผู้ใช้ไฟฟ้ามีชุดกรองฮาร์มอนิก หรือคาปาซิเตอร์ของชุดปรับปรุงตัวประกอบกำลัง ซึ่งอาจทำให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์ ขยายกระแสฮาร์มอนิกลำดับคู่ให้มีค่ามากขึ้น
- กระแสผิดเพี้ยนนี้ ไม่ให้มีผลของส่วนประกอบไฟตรง (dc offset not allowed)
- นิยามของ TDD คือ

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100\% \qquad (6.1)$$

เมื่อ I_h = ขนาดของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ h (ค่า rms)

h = ลำดับฮาร์มอนิก

I_L = ขนาดของกระแสในช่วงความต้องการสูงสุด

- ถ้าโหลดที่ กำเนิดฮาร์มอนิกประกอบด้วย คอนเวอร์เตอร์ ที่มีจำนวนพัลส์ (q) มากกว่า 6 พัลส์ ค่าจำกัดในตารางให้เพิ่มขึ้นได้ด้วยตัวประกอบการคูณ $\sqrt{q/6}$ เช่น ถ้าแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกเป็นคอนเวอร์เตอร์แบบ 12 พัลส์ ค่าจำกัดในตารางของฮาร์มอนิกเฉพาะตัวให้เพิ่มขึ้นด้วยตัวคูณ $\sqrt{2}$
- ฮาร์มอนิกที่ไม่ใช่ฮาร์มอนิกเฉพาะตัว (Non-characteristic harmonic) ให้มีค่าน้อยกว่า ร้อยละ 25 ของค่าจำกัดในตารางรางที่ 6.1

จากตารางค่าจำกัดกระแสฮาร์มอนิกตามมาตรฐาน IEEE Std.519-1992 พบว่า จะยอมให้ผู้ใช้ไฟฟ้าปล่อยกระแสฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบได้มากหรือน้อยขึ้นกับระบบและ ขนาดของโหลด เช่น ถ้าผู้ใช้ไฟฟ้ามีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับระบบจะยอมให้มีค่าจำกัดได้สูงกว่าผู้ใช้ไฟขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับระบบ

6.1.2 **แนวปฏิบัติสำหรับการไฟฟ้า**

เพื่อรักษาคุณภาพการจ่ายกำลังไฟฟ้า ทางการไฟฟ้าจะพิจารณาในเรื่องของระดับแรงดันฮาร์มอนิกผิดเพี้ยนที่จุด PCC โดยใช้ดัชนีวัด 2 ตัวคือ แรงดันฮาร์มอนิกผิดเพี้ยนรวม (Total harmonic distortion :THDv) และ แรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ (Individual harmonic voltage : Vh) การไฟฟ้าจะพยามรักษาระดับแรงดันผิดเพี้ยนที่จุด PCC ด้วยการจำกัดค่ากระแสฮาร์มอนิกจากผู้ใช้ไฟฟ้า (ดังตารางที่ 6.1) และสำหรับค่าจำกัดของระดับแรงดันผิดเพี้ยนจะแบ่งตามระดับแรงดันดังตารางที่ 6.2 ซึ่งค่าจำกัดนี้เป็นสภาวะแรงดันปกติ สำหรับสภาวะการใช้งานในช่วงสั้น ๆ ของการเริ่มเดินเครื่องจักรหรือสภาวะผิดปกติ ค่าจำกัดของแรงดันฮาร์มอนิก สามารถเพิ่มค่าได้อีก 50% จากค่าที่กำหนดไว้ในตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 ค่าจำกัดระดับแรงดันฮาร์มอนิก ตาม IEEE Std.519-1992

Bus Voltage At PCC (V_n)	*Individual Harmonic Voltage Distortion (%)*	*Total Voltage Distortion - THDv (%)*
$V_n \leq 69$ kV	3.0	5.0
69 kV $< V_n \leq 161$ kV	1.5	2.5
$V_n > 161$ kV	1.0	1.5

**High-voltage systems can have up to 2.0% THD where the cause is an HVDC terminal that will attenuate by the time it is tapped for a user.*

หมายเหตุ

- นิยามของ THDv คือ

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100\% \qquad (6.2)$$

เมื่อ V_h = ขนาดของแรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ h (ค่า rms)

h = ลำดับฮาร์มอนิก

V_1 = ขนาดของแรงดันที่ความถี่หลักมูลในสภาวะปกติของระบบ (ค่า rms)

จากตารางจะพบว่าที่ระดับแรงดันสูงๆ การไฟฟ้าจะต้องให้ความสำคัญกับระดับแรงดันผิดเพี้ยน ค่าแรงดันฮาร์มอนิกจะมีค่าคงที่โดยไม่ขึ้นกับเลขลำดับฮาร์มอนิก และจะกำหนดให้ระดับแรงดันผิดเพี้ยนมีค่าต่ำๆ

6.2 **มาตรฐาน** G.5/3-1976 [2,11]

มาตรฐาน G.5/3-1976 เป็นมาตรฐานที่การไฟฟ้าทั้ง 3 แห่ง (กฟผ. กฟภ. และ กฟน.) ใช้อ้างอิง ในการออกข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม สำหรับรายละเอียดของมาตรฐานมีดังนี้

ในส่วนค่าจำกัดกระแสหรือแรงดันฮาร์มอนิก มาตรฐานฉบับนี้จะกำหนดค่าจำกัดของกระแสฮาร์มอนิก ที่การไฟฟ้าจะยอมให้ผู้ใช้ไฟฟ้าป้อนเข้าสู่ระบบเพื่อไม่ให้เกิดแรงดันฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าเกินกว่าค่าที่กำหนด โดยการพิจารณาแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ซึ่งพิจารณาตามขนาดของอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก โดยเฉพาะ คอนเวอร์เตอร์ แต่ละขั้นตอนอธิบายได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 จะใช้กับอุปกรณ์ขนาดเล็กทั่วไป โดยขนาดใหญ่สุดของตัวคอนเวอร์เตอร์ หรือ A.C.regulator เมื่อต่อเข้ากับระบบแรงดันขนาด 415 V. 6.6 หรือ 11 kV. ในสภาวะปกติ จะยอมรับได้โดยไม่ต้องพิจารณาระบบอย่างละเอียดนอกเหนือไปจากการพิจารณาตามปกติเมื่อมีการต่อโหลดชนิดใหม่ เช่น เรื่อง Thermal rating ของวงจร เรื่อง Voltage regulation เป็นต้น

ค่าจำกัดของขั้นตอนที่ 1

(ก) อุปกรณ์ 3 เฟส ขนาดสูงสุดของคอนเวอร์เตอร์ หรือ A.C. regulator จะต่อเข้ากับระบบ 415 V. 6.6 หรือ 11 kV. โดยไม่ต้องผ่านการพิจารณาอย่างละเอียดจากการไฟฟ้านั้นต้องมีขนาดใหญ่สุดไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ในตารางที่ 6.3

(ข) อุปกรณ์ 1 เฟส เครื่องใช้ไฟฟ้าเฟสเดียวที่ประกอบด้วยชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์เพื่อควบคุมการทำงาน หรือ จ่ายไฟให้กับเครื่องดังกล่าว และ ออกแบบเพื่อใช้งานในบ้านอยู่อาศัย หรือ งานในลักษณะคล้ายคลึงกัน ซึ่งควรจะเป็นไปตามมาตรฐาน BS-5406 (European Standard EN50.006) คอนเวอร์เตอร์แบบ 1 เฟส หรือ A.C.regulator ซึ่งตามทฤษฎีจะไม่สร้างฮาร์มอนิกลำดับคู่ และจุดมุ่งหมายในการใช้คือ ในโรงงานอุตสาหกรรม และ เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ ซึ่งควรมีขนาดไม่เกิน 5 kVA เมื่อใช้กับแรงดัน 240 V. ขนาดไม่เกิน 7.5 kVA เมื่อใช้กับระดับแรงดัน 415 หรือ 450 V. ส่วนคอนเวอร์เตอร์ หรือ A.C. regulator ที่สร้างทั้งฮาร์มอนิกลำดับคู่และคี่ จะไม่ให้ใช้

เมื่อมีการติดตั้งอุปกรณ์ 1 เฟส หลายตัว ต้องพยามกระจายให้โหลดเท่ากันทั้ง 3 เฟส ส่วนการประเมินผลจะพิจารณาตามเงื่อนไขในขั้นตอนที่ 2

ตารางที่ 6.3 ขนาดใหญ่ที่สุดของคอนเวอร์เตอร์ และ A.C. regulator แต่ละตัวภายใต้ค่าจำกัดของ ขั้นตอนที่ 1

Supply System Voltage (kV) at Point of Common Coupling	3-Phase Converters			3-Phase A.C. Regulators	
	3-Pulse (kVA)	6-Pulse (kVA)	12-Pulse (kVA)	6-Thyristor (kVA)	3-Thyristor/ 3- Diode (kVA)
0.415	8	12	-	14	10
6.6 and 11	85	130	250*	150	100

*This limit applies to 12-pulse devices, and to combinations of 6-pulse devices always operated as 12-pulse devices, employing careful control of the firing angles and the d.c. ripple to minimize non-characteristic harmonics, e.g. 3^{rd}, 5^{th} and 7^{th}

ขั้นตอนที่ 2 ถ้าอุปกรณ์มีขนาดใหญ่กว่าที่กำหนดในขั้นตอนที่ 1 การพิจารณาจะต้องทำในขั้นตอนที่ 2 โดยการไฟฟ้าจะกำหนดค่าจำกัดของกระแสฮาร์มอนิกแต่ละลำดับที่จะยอมให้ผู้ใช้ไฟฟ้าป้อนเข้าสู่ระบบไฟฟ้า โดยพิจารณาที่ จุด PCC

(ก) อุปกรณ์ 3 เฟส การไฟฟ้าจะยอมให้ผู้ใช้ไฟฟ้าต่ออุปกรณ์แหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกที่ที่มีขนาดใหญ่เกินกว่าที่กำหนดไว้ใน ขั้นตอนที่ 1 ได้ หากเป็นไปตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้

- อุปกรณ์ของผู้ใช้ไฟฟ้าไม่สร้างกระแสฮาร์มอนิกป้อนเข้าสู่ระบบไฟฟ้าที่จุด PCC (ในเฟสใดๆ) เกินกว่าค่าที่กำหนดในตารางที่ 6.4
- แรงดันฮาร์มอนิกที่จุด PCC ก่อนการติดตั้งโหลดใหม่จะต้องมีค่าไม่เกิน ร้อยละ 75 ของค่าในตารางที่ 6.5
- ค่า Short-circuit level จะต้องไม่ต่ำจนเกินไป

*ตารางที่ 6.4 ค่าจำกัดกระแสฮาร์มอนิกสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าที่จุด PCC ภายใต้ข้อจำกัดของ ขั้นตอนที่ 2**

Supply System Voltage (kV) at Point of Common Coupling	Harmonic Number and Current (Arms)																	
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0.415	48	34	22	56	11	40	9	8	7	19	6	16	5	5	5	6	4	6
6.6 and 11	13	8	6	10	4	8	3	3	3	7	2	6	2	2	2	2	1	1
33	11	7	5	9	4	6	3	2	2	6	2	5	2	1	1	2	1	1
132	5	4	3	4	2	3	1	1	1	3	1	3	1	1	1	1	1	1

* *A tolerance of +10% or 5A (whichever is the greater) is permissible, provided it applies to not more than two harmonis.*

ตารางที่ 6.5 ค่าจำกัดความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกที่จุดใดๆในระบบ

Supply System Voltage (kV) at Point of Common Coupling	Total Harmonic Voltage	Individual Harmonic Voltage Distortion (%)	
	Distortion V_T (%)	Odd	Even
0.415	5	4	2.0
6.6 and 11	4	3	1.75
33 and 66	3	2	1.0
132	1.5	1	0.5

(ข) อุปกรณ์ 1 เฟส สำหรับอุปกรณ์เฟสเดียวที่เป็นตัวสร้างฮาร์มอนิกที่มีขนาดใหญ่เกินกว่าค่าที่กำหนดในขั้นตอนที่ 1 มาตรฐานฉบับนี้ไม่แนะนำให้ใช้ เพราะจะมีปัญหาเรื่องความไม่สมดุลเกิดขึ้น

ขั้นตอนที่ 3 เมื่ออุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น ไม่ผ่านการประเมินในขั้นตอนที่ 2 กล่าวคือ มีกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นเกินค่าจำกัดในตารางที่ 6.4 หรือ มีแรงดันผิดเพี้ยนที่จุด PCC มากกว่า ร้อยละ 75 ของค่าจำกัดในตารางที่ 6.5 ก่อนที่จะต่อโหลดใหม่เพิ่ม การพิจารณาการอนุญาต ให้ต่อเข้ากับระบบได้หรือไม่นั้น จะประเมินในขั้นตอนที่ 3 โดยผู้ใช้ไฟฟ้ายังคงต่อโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นเข้ากับระบบได้ หลังจากได้ทำการศึกษาวิเคราะห์กระแสและแรงดันฮาร์มอนิกในสภาพที่เกิดขึ้นปัจจุบัน และมีการจำลองผลที่จะเกิดขึ้นในอนาคต เมื่อต่อโหลดใหม่เพิ่มอย่างละเอียด โดยผู้ใช้ไฟฟ้าจะได้รับอนุญาต ให้ต่ออุปกรณ์เข้ากับระบบได้หากผลการศึกษาวิเคราะห์ได้ว่าระดับแรงดันฮาร์มอนิกที่จุดใดๆในระบบไฟฟ้ามีค่าไม่เกินค่าที่กำหนดในตารางที่ 6.5

6.3 มาตรฐาน IEC 1000-2-2 -1990 และ 1000-2-4-1994 [12]

มาตรฐานของ IEC ถือเป็นมาตรฐานสากลที่หลายประเทศยอมรับดังนั้นในส่วนที่เกี่ยวข้องกับฮาร์มอนิกจึงควรศึกษาด้วย สำหรับเกณฑ์การกำหนดค่าจำกัดทางด้านฮาร์มอนิกมีอยู่ในมาตรฐาน IEC 1000-2-2-1990 และ IEC 1000-2-4-1994

6.3.1 มาตรฐาน IEC 1000-2-2-1990 [13]

สำหรับส่วนที่เกี่ยวข้องกับฮาร์มอนิกของ มาตรฐาน IEC 1000-2-2-1990 จะใช้กับระดับแรงดัน 415/240 V. โดยค่าที่กำหนดจะเป็นแรงดันฮาร์มอนิกในแต่ลำดับ ดังตารางที่6.6

ตารางที่ 6.6 ค่าจำกัดของระดับแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับแรงดันต่ำ (415/240 Volt)

Odd harmonics (non-multiple of 3)		*Odd harmonics (multiple of 3)*		*Even harmonics*	
Harmonic order (h)	*Harmonic voltage (%)*	*Harmonic order (h)*	*Harmonic voltage (%)*	*Harmonic order (h)*	*Harmonic voltage (%)*
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	> 21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			12	0.2
25	1.5			>12	0.2
>25	0.2+0.5x25/h				

สำหรับ ค่า Total Distortion factor (D) นิยามเป็น

$$D = \sqrt{\sum_{h=2}^{N} U_h^2} \qquad (6.3)$$

เมื่อ $U_h = U_h/U_1$

h = เลขลำดับฮาร์มอนิก

U_h = ขนาดของแรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ h

U_1 = ขนาดของแรงดันที่ความถี่หลักมูล

N = เลขจำนวนเต็มบวกซึ่งในทางปฏิบัติอาจคิดเพียง N = 40

สำหรับค่าตัวประกอบความผิดเพี้ยนรวม (D) นี้ จะกำหนดค่า เป็น 0.08 หรือ ร้อยละ 8 ซึ่งเป็นค่า THD_v นั่นเอง และจะเห็นว่า ค่าจำกัดของแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับจะลดลง เมื่อลำดับฮาร์มอนิกเพิ่มขึ้น

6.3.2 มาตรฐาน IEC 1000-2-4-1994

เกี่ยวกับฮาร์มอนิกในมาตรฐานฉบับนี้จะกำหนดค่าจำกัดระดับฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรม ทั้งจุด PCC และ จุดที่อยู่ภายในระบบโรงงานหรือจุดติดตั้งอุปกรณ์ ซึ่งเรียกว่า In-plant of coupling (IPC) โดยการพิจารณาจะแบ่งออกเป็น Class ดังนี้

- *Class 1* ค่าจำกัดใน Class นี้จะกำหนดเพื่อใช้กับอุปกรณ์ที่มีความไวต่อสิ่งรบกวนจากระบบจ่ายไฟมาก เช่น อุปกรณ์เครื่องมือวัดของห้องปฏิบัติการ อุปกรณ์ป้องกันของระบบอัตโนมัติคอมพิวเตอร์ เป็นต้น
- *Class 2* ค่าจำกัดใน Class นี้ จะใช้ทั่วไป กับโรงงานอุตสาหกรรม ทั้งจุด PCC และ IPC
- *Class 3* ค่าจำกัดใน Class นี้ จะใช้ที่ จุด IPC ในโรงงานอุตสาหกรรมเท่านั้น ซึ่งระดับค่าจำกัดจะมีค่าสูงกว่าค่าจำกัดของ Class 2 จะพิจารณาค่าจำกัดใน Claas 3 เมื่อพบเงื่อนไขดังตัวอย่างต่อไปนี้
    - โหลดสำคัญๆส่วนใหญ่ ต่อตรงอยู่กับคอนเวอร์เตอร์
    - มีเครื่องเชื่อม
    - มอเตอร์ขนาดใหญ่ที่มีการสตาร์ทอยู่บ่อยๆ
    - การทำงานของโหลดเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

สำหรับค่าจำกัดของแรงดันฮาร์มอนิกของมาตรฐาน IEC 1000-2-4-1994 สรุปได้ดังตารางที่ 6.7 ถึงตารางที่ 6.9

ตารางที่ 6.7 ค่าจำกัดของระดับฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับ (ไม่รวม ฮาร์มอนิกที่เป็นพหุคูณของ 3)

Oder *h*	*Class 1* U_h(%)	*Class 2* U_h(%)	*Class 3* U_h(%)	*Oder* *h*	*Class 1* U_h(%)	*Class 2* U_h(%)	*Class 3* U_h(%)
5	3	6	8	2	2	2	3
7	3	5	7	4	1	1	1.5
11	3	3.5	5	6	0.5	0.5	1
13	3	3	4.5	8	0.5	0.5	1
17	2	2	4	10	0.5	0.5	1
19	1.5	1.5	4	>10	0.2	0.2	1
23	1.5	1.5	3.5				
25	1.5	1.5	3.5				
>25	0.2+12.5/h	0.2+12.5/h	$5x\sqrt{11/h}$				

ตารางที่ 6.8 ค่าจำกัดของระดับฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับ (ฮาร์มอนิกที่เป็นพหุคูณของ 3 ลำดับคี่)

Order *h*	*Class 1* *U_h (%)*	*Class 2* *U_h (%)*	*Class 3* *U_h (%)*
3	3	5	6
9	1.5	1.5	2.5
15	0.3	0.3	2
21	0.2	0.2	1.75
>21	0.2	0.2	1

ตารางที่ 6.9 ค่าจำกัดของแรงดันฮาร์มอนิกผิดเพี้ยนรวม (THD)

Total harmonic distortion (THD)	*Class 1*	*Class 2*	*Class 3*
	5 %	8 %	10 %

จากตารางค่าจำกัดของ IEC 1000-2-4-1994 จะเห็นได้ว่าค่าจำกัดนั้นจะขึ้นกับประเภทของ Class และมีค่าลดลงเมื่อลำดับฮาร์มอนิกเพิ่มขึ้น และจะเห็นได้ว่า มาตรฐาน IEC นั้น จะกำหนดค่าจำกัดไปถึงจุดที่แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกต่อใช้งานอยู่ ในขณะที่ มาตรฐาน IEEE-519 จะประเมินที่จุดต่อร่วมเท่านั้น จากมาตรฐาน IEEE Std.519-1992,G.5/3,IEC 1000-2-2,IEC 1000-2-4 จะเห็นว่า ค่าจำกัดเกี่ยวกับฮาร์มอนิกจะมีทั้ง ค่าจำกัดของกระแส และ ค่าจำกัดของแรงดัน สรุปได้ดังตารางที่ 6.10

ตารางที่ 6.10 ตารางเปรียบเทียบการกำหนดกระแสฮาร์มอนิกและแรงดันฮาร์มอนิกตามมาตรฐานที่กล่าวถึงในวิทยานิพนธ์นี้

มาตรฐาน	***ดรรชนีที่ใช้กำหนดค่าจำกัด***	
IEEE Std.519-1992	TDD (% of I_L),Ih (% of I_L)	THD ,Vh
G.5/3-1976	Ih (Arms)	THD,Vh
IEC 1000-2-2	ไม่ได้กำหนด	THD,Vh
IEC 1000-2-4	ไม่ได้กำหนด	THD,Vh

6.4 ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม [3]

ข้อกำหนดฯนี้การไฟฟ้าทั้ง 3 แห่งในประเทศไทย ได้แก่ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) และ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ได้ตั้งคณะทำงานขึ้นเพื่อ

ปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า ซึ่งในส่วนของคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่เกี่ยวกับเรื่องฮาร์มอนิกได้จัดทำข้อกำหนดขึ้น เนื่องจากอาจมีการบังคับใช้ขึ้นในประเทศไทยดังนั้นจึงได้กล่าวไว้ในวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งมีรายละเอียดในส่วนของค่าจำกัดของฮาร์มอนิกสรุปได้ดังนี้

6.4.1 ขอบเขตของข้อกำหนด

- เพื่อเป็นข้อกำหนดกฎเกณฑ์สำหรับขีดจำกัดและวิธีการตรวจสอบฮาร์มอนิก (Harmonics) สำหรับลูกค้าผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม
- เพื่อกำหนดมาตรการให้ผู้ใช้ไฟฟ้าแก้ไขและปรับปรุงวงจรที่ทำให้เกิดฮาร์มอนิกที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนด
- ใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภทไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear Load) ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมสำหรับระบบไฟฟ้า ทั้งอุปกรณ์ชนิดเฟสเดียวและสามเฟส

6.4.2 วัตถุประสงค์ของข้อกำหนด

เพื่อกำหนดขีดจำกัดที่ยอมรับได้ของระดับความเพี้ยนของแรงดันที่เกิดจากฮาร์มอนิก (Harmonic Voltage Distortion) และระดับความเพี้ยนของกระแสที่เกิดจากฮาร์มอนิก (Harmonic Current Distortion) ของอุปกรณ์ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม

6.4.3 ค่าจำกัดของกระแสและแรงดันฮาร์มอนิก

มาตรฐานอ้างอิงที่ข้อกำหนดนี้นำมาใช้ในส่วนของค่าจำกัดจะอ้างอิงมาจากมาตรฐานของประเทศอังกฤษ G.5/3-1976 :Engineering Recommendation แต่ได้รวมระดับแรงดันที่มีใช้จริงในประเทศไทยเข้าไปด้วย ดังตารางที่ 6.11 และ 6.12 ซึ่งเป็นขีดจำกัดของกระแส และ แรงดัน ตามลำดับ ดังนั้นวิธีการประเมินจะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนตามมาตรฐาน G.5/3-1976

*ตารางที่ 6.11 ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใดๆที่จุดต่อร่วม *(PCC)*

ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม (kV)	*อันดับฮาร์มอนิกและขีดจำกัดของกระแส (A rms)*																	
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0.400	48	34	22	56	11	40	9	8	7	19	6	16	5	5	5	6	4	6
11 and 12	13	8	6	10	4	8	3	3	3	7	2	6	2	2	2	2	1	1
22 , 24 and 33	11	7	5	9	4	6	3	2	2	6	2	5	2	1	1	2	1	1
69	8.8	5.9	4.3	7.3	3.3	4.9	2.3	1.6	1.6	4.9	1.6	4.3	1.6	1	1	1.6	1	1
115 and above	5	4	3	4	2	3	1	1	1	3	1	3	1	1	1	1	1	1

* ยอมให้นำค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 10 หรือ 0.5 A (ค่าที่มากกว่าค่าใดค่าหนึ่ง) มาใช้กับขีดจำกัดของกระแสแต่ละอันดับได้ไม่เกิน 2 อันดับ

ตารางที่ 6.12 ขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใดๆที่จุดต่อร่วม(PCC) (รวมทั้งระดับความเพี้ยนที่มีอยู่เดิม)

ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม (kV)	***ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดัน (%)***	***ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันแต่ละอันดับ (%)***	
		อันดับคี่	***อันดับคู่***
0 400	5	4	2
11 , 12 , 22 and 24	4	3	1.75
33	3	2	1
69	2.45	1.63	0.82
115 and above	1.5	1	0.5

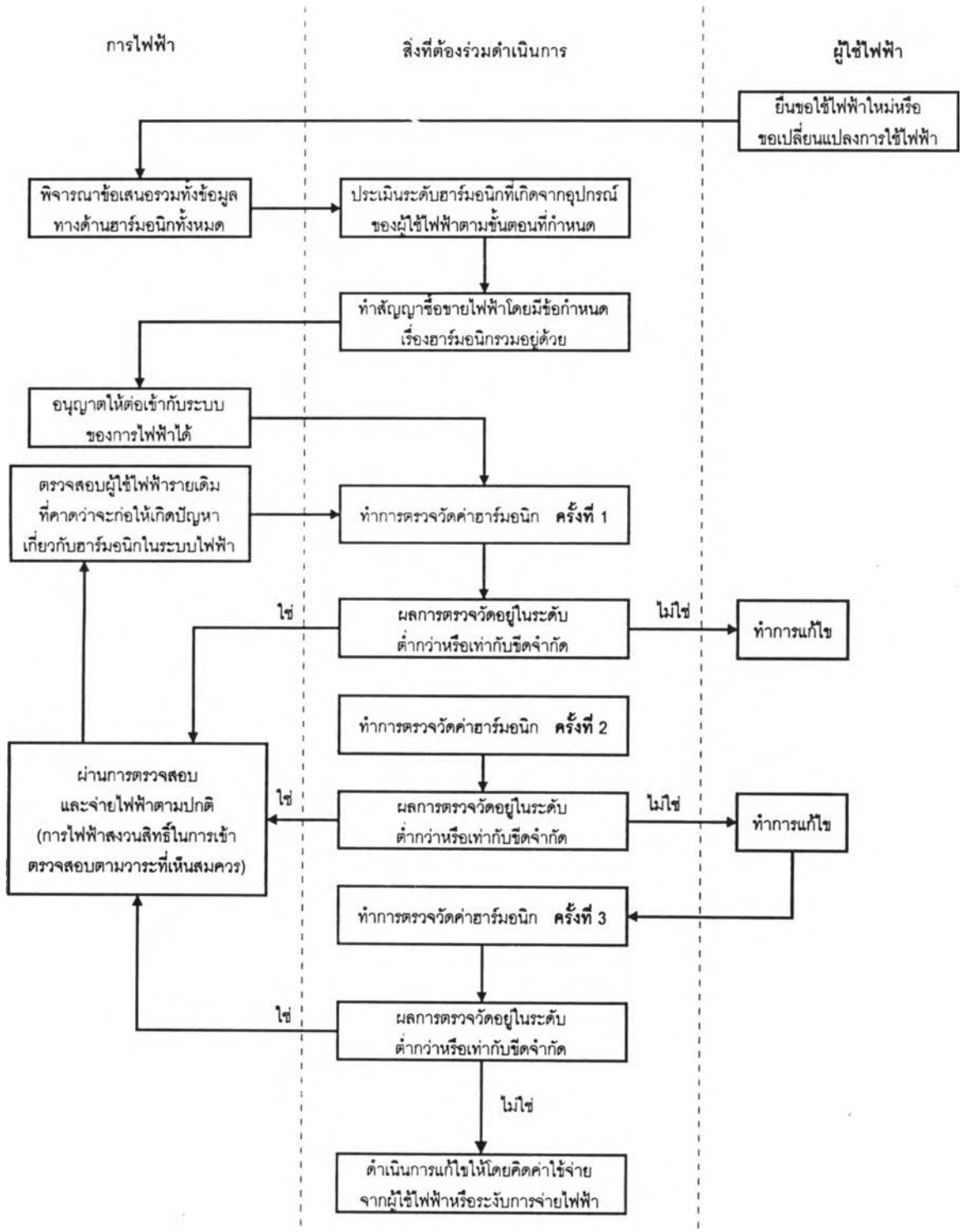
6.4.4 การบังคับใช้

การบังคับใช้ จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ คือ การไฟฟ้า สิ่งที่ต้องร่วมดำเนินการระหว่างผู้ใช้ไฟฟ้าและการไฟฟ้า ผู้ใช้ไฟฟ้า ซึ่งรายละเอียดแสดงดังแผนผังในรูปที่ (6.1)

(1) **ผู้ขอใช้ไฟฟ้ารายใหม่** ผู้ขอใช้ไฟฟ้ารายใหม่ต้องจัดส่งรายละเอียดของอุปกรณ์และการคำนวณให้การไฟฟ้าฯ ตรวจสอบ โดยแสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าแล้ว จะไม่ก่อให้เกิดฮาร์มอนิกเกินขีดจำกัดฯ ข้างต้น การไฟฟ้าฯ ขอสงวนสิทธิ์ในการไม่จ่ายไฟฟ้า หากการต่อใช้ไฟฟ้าดังกล่าวก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้ารายอื่น

(2) **ผู้ขอเปลี่ยนแปลงการใช้ไฟฟ้า** ผู้ขอเปลี่ยนแปลงการใช้ไฟฟ้าจะต้องปฏิบัติเช่นเดียวกับข้อ (1) โดยจะต้องจัดส่งรายละเอียดของอุปกรณ์และการคำนวณทั้งโหลดเดิมและโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงให้การไฟฟ้าฯ ตรวจสอบ

(3) **ผู้ใช้ไฟฟ้ารายเดิม** ถ้าทางการไฟฟ้าฯ ตรวจสอบแล้วพบว่าการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้ารายเดิมนั้น ก่อให้เกิดฮาร์มอนิกเกินขีดจำกัดฯ ข้างต้น ผู้ใช้ไฟฟ้าจะต้องทำการปรับปรุงแก้ไขเพื่อลดผลกระทบดังกล่าว หากผู้ใช้ไฟฟ้าไม่ดำเนินการปรับปรุงแก้ไข การไฟฟ้าฯ จะเข้าไปทำการปรับปรุงแก้ไขโดยคิดค่าใช้จ่ายจากผู้ใช้ไฟฟ้า หรืองดการจ่ายไฟฟ้า



รูปที่ 6.1 แผ-นผังแสดงวิธีการบังคับใช้ข้อกำหนดของการไฟฟ้า

6.5 การตรวจวัดฮาร์มอนิก [8,10,15]

การตรวจวัดฮาร์มอนิกมีความสำคัญและเป็นสิ่งจำเป็นในการวิเคราะห์ระบบ เช่น ในโรงงานอุตสาหกรรมการตรวจวัดเพื่อ

- ใช้วิเคราะห์การออกแบบชุดกรองฮาร์มอนิก และ ชุดคาปาซิเตอร์
- ใช้วิเคราะห์ในการติดตั้งชุดกรองฮาร์มอนิก และ ชุดคาปาซิเตอร์
- ตรวจวัดเพื่อตรวจสอบกับมาตรฐานหรือกฎข้อบังคับ

นอกจากนี้ ผลการตรวจวัดยังใช้ตรวจสอบ ผลการจำลอง (Simulation) ดังนั้นเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องจะต้องคำนึงถึง ส่วนประกอบของการวัด ซึ่งมีองค์ประกอบหลักๆ ได้แก่ เครื่องมือวัด วิธีการวัด และจุดตรวจวัด จะต้องเลือกให้เหมาะสมกับลักษณะของฮาร์มอนิกที่จะทำการวัด สิ่งที่จะต้องให้ความสำคัญและต้องศึกษาเกี่ยวกับการวัดมีดังนี้

6.5.1 จุดตรวจวัด (Measurement point)

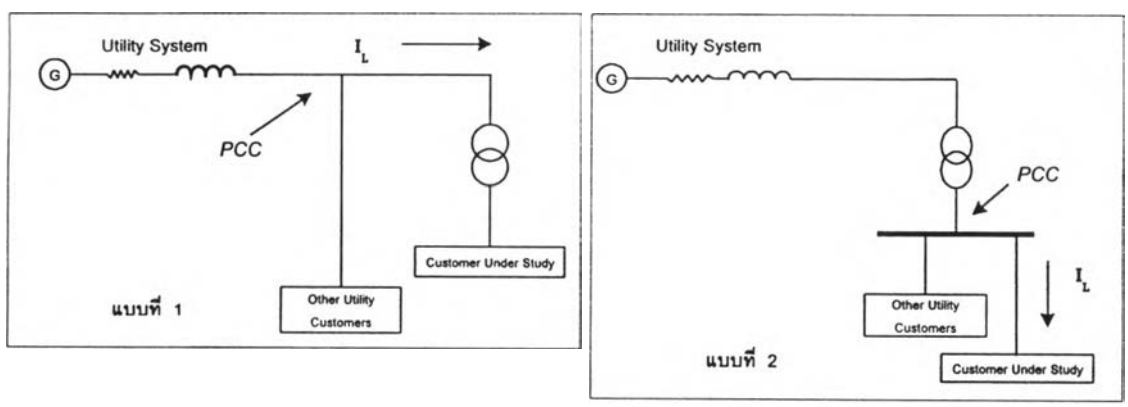
โดยทั่วไปแล้ว จุดตรวจวัดฮาร์มอนิกจะพิจารณาตามวัตถุประสงค์การตรวจวัดว่าต้องการวิเคราะห์ในส่วนใด เช่น การประเมินตามมาตรฐาน หรือ ข้อบังคับ ต้องการวิเคราะห์ถึงผลกระทบที่เกิดจากฮาร์มอนิก ต้องการหาคุณลักษณะของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก เป็นต้น

(ก) ตรวจวัดที่จุดต่อร่วม (PCC) วัตถุประสงค์ในการตรวจวัดที่จุดต่อร่วม เพื่อประเมินค่ากระแสหรือแรงดันฮาร์มอนิก เปรียบเทียบกับมาตรฐาน หรือ กฎข้อบังคับ จุดต่อร่วม โดยทั่วไปจะมี 2 แบบ ดังรูปที่ 6.2 ซึ่งถ้าเป็นโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ แล้วจุดต่อร่วมจะเป็นแบบที่ 1 (รูปที่ 6.2 ก) เพราะโรงงานส่วนใหญ่จะมีหม้อแปลงเป็นของตัวเอง ที่ต่อจากระบบจ่ายไฟของการไฟฟ้าโดยตรง ในกรณีที่จุดต่อร่วมเป็นระบบแรงดันต่ำ สามารถตรวจวัดได้โดยตรง ส่วนระดับแรงดันสูง จุดต่อเครื่องวัดจะวัดด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลงแรงดัน (Voltage transformer :VT) และ หม้อแปลงกระแส (Current transformer :CT) ดังนั้นคุณสมบัติของ หม้อแปลงกระแส หรือ หม้อแปลงแรงดัน จะต้องตอบสนองได้อย่างถูกต้องในความถี่ในช่วงกว้าง และผลที่ได้จากการวัดที่ด้านแรงดันต่ำ หากจะประเมินกับมาตรฐาน หรือข้อบังคับจะต้องแปลงกลับไปอยู่ด้านจุดต่อร่วมซึ่งเป็นด้านแรงดันสูง โดยแปลงผ่านอัตราส่วนการแปลงของหม้อแปลงนั่นเอง อีกทั้งยังต้องพิจารณาลักษณะการต่อหม้อแปลงด้วย เพราะมีอิทธิพลต่อฮาร์มอนิกบางลำดับ เช่น หม้อแปลงที่ต่อแบบ เดลตา - วาย ฮาร์มอนิกลำดับศูนย์จะไม่ไหลผ่านระหว่างขดลวด

(ข) ตรวจวัดที่แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก (Harmonic source) วัตถุประสงค์ของการตรวจวัดที่จุดนี้เพื่อศึกษาถึงคุณลักษณะของกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น เพื่อนำมาประกอบการพิจารณาประเมินผู้ใช้

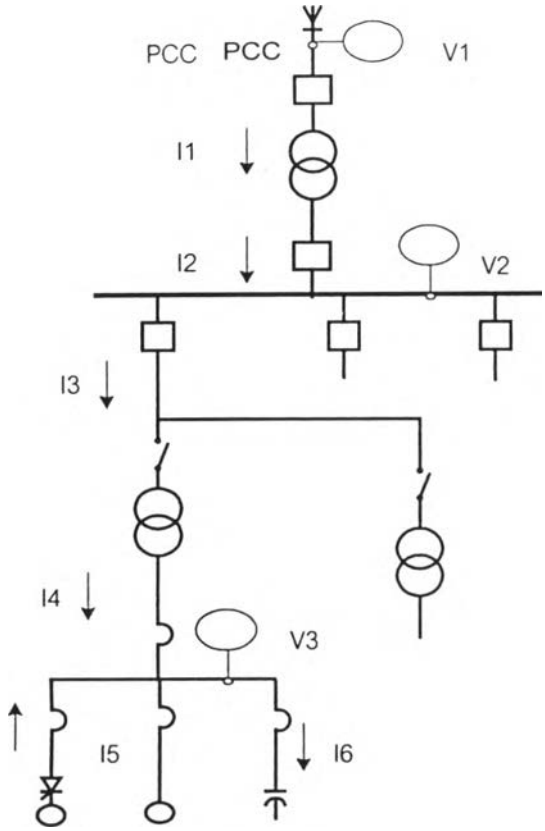
ไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องมากขึ้น เพื่อดูผลของการหักล้างของกระแสฮาร์มอนิกบางลำดับ เช่น เมื่อใช้คอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ 2 ชุดต่อขนานกัน ฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 และ 7 จะหักล้างกันไป และข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด ณ จุดนี้จะเป็นข้อมูลสำหรับโปรแกรมการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโดยทั่วไป ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะอ้างถึงข้อมูลจุดนี้เช่นกัน

(ค) ตรวจวัดที่ส่วนย่อยอื่นๆในระบบ ส่วนย่อยอื่นๆที่ควรตรวจวัดคือ จุดต่อชุดคาปาซิเตอร์ หรืออุปกรณ์เชิงเส้นอื่นๆ ทั้งนี้ก็เพื่อ ศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดจากฮาร์มอนิก เช่น มีกระแสฮาร์มอนิกบางส่วนไหลเข้าอุปกรณ์จนเป็นเหตุทำให้รับกระแสหรือ แรงดันเกินค่าพิกัดของอุปกรณ์นั้นๆ หรือไม่ จุดย่อยอื่นๆอีกจุดที่ควรสนใจ คือ โรงงานข้างเคียง หรือ ระบบข้างเคียงที่อาจได้รับผลกระทบจากโรงงานที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก ดังนั้น ผลที่ได้จากการวัด ควรวิเคราะห์ถึงทิศทางการไหลของกระแสฮาร์มอนิกด้วย



(ก) (ข)

รูปที่ 6.2 ตำแหน่งของจุดต่อร่วม (PCC)



I# จุดตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิก

V# จุดตรวจวัดแรงดันฮาร์มอนิก

Key

1. Incoming Line : Voltage & Current
2. Incoming Main Breaker : Voltage & Current
3. Feeder Breaker : Current
4. Low voltage Substation

Main Breaker : Voltage & Current

5. Harmonic Source : Current
6. Capacitor Bank : Current

รูปที่ 6.3 ตัวอย่างตำแหน่งการเลือกจุดตรวจวัดฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรม

6.5.2 **คุณลักษณะของสัญญาณที่ตรวจวัด** (Characteristics of signal to be measured)

คุณลักษณะของสัญญาณฮาร์มอนิกในที่นี้ หมายถึง สัญญาณของ กระแส หรือ แรงดัน ถ้าแบ่งตาม IEC แล้ว คุณสมบัติของสัญญาณฮาร์มอนิกมีดังนี้

(ก) ฮาร์มอนิกที่มีลักษณะคงตัวเปลี่ยนแปลงอย่างช้า (quasi-stationary harmonics)

(ข) ฮาร์มอนิกทีมีการกระเพื่อม (fluctuating harmonics)

(ค) ฮาร์มอนิกที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว (rapidly changing harmonics)

(ง) ฮาร์มอนิกที่ไม่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่หลักมูล (interharmonic)

ลักษณะสัญญาณฮาร์มอนิกในข้อ (ก) เช่น ฮาร์มอนิกที่เกิด จากทีวี หลอดไฟที่ปรับความสว่างของแสงได้ เป็นต้น การตรวจวัดในระยะเวลานาน (long-term) ในระบบ เมื่อมีผลของฮาร์มอนิกที่เปลี่ยนแปลงทันทีทันใดจะไม่พิจารณาความสำคัญของผลกระทบนี้สำหรับสัญญาณฮาร์มอนิกที่มีลักษณะคงที่

ลักษณะสัญญาณฮาร์มอนิกในข้อ (ข) เช่นกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจาก การปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ การควบคุมเฟสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมดังนั้นเครื่องมือวัดจะต้อง วิเคราะห์การแสฮาร์มอนิกที่มีการกระเพื่อมอย่างต่อเนื่องได้

ลักษณะสัญญาณฮาร์มอนิกในข้อ (ค) เป็นฮาร์มอนิกที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว หรือ เป็นฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นสูงๆในช่วงเวลาสั้นๆ (1 วินาที หรือ น้อยกว่า) เช่น การทำงานของ telecontrol-receiver การตรวจวัดสัญญาณในลักษณะนี้ต้องใช้เครื่องมือที่มีความแม่นยำมาก สำหรับสัญญาณในข้อ (ง) จะไม่กล่าวถึงในที่นี้ สัญญาณที่ตรวจวัดจะแบ่งเป็นสัญญาณกระแส และ แรงดันฮาร์มอนิกโดยพิจารณาดังนี้

(ก) การตรวจวัดแรงดันฮาร์มอนิก การวัดแรงดันฮาร์มอนิก ถ้าเป็นระบบแรงดันต่ำสามารถต่อวัดได้โดยตรง ส่วนระบบแรงดันสูง จะวัดผ่านด้านแรงต่ำของหม้อแปลงแรงดัน (VT) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมแล้ว VT ที่ใช้ จะมีความผิดพลาดไม่เกิน ร้อยละ 3 สำหรับช่วงความถี่ ไม่เกิน 5 กิโลเฮิร์ท (kHz) นั่นคือต้องมีการตอบสนองความถี่ได้ดีในช่วงกว้าง และไม่ควรใช้ Capacitively coupled voltage transformer (CCVTs) เพราะมีวงจรจูนอยู่ ซึ่งจะทำให้การวัดฮาร์มอนิกผิดพลาดได้

(ข) การตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิกถ้าพิจารณาตาม IEEE Std.519-1992 จะต้องตระหนักไว้ว่า ค่าจำกัดของกระแสฮาร์มอนิกผิดเพี้ยนรวมเขียนอยู่ในรูปสมการร้อยละของกระแสคงที่ค่าหนึ่ง (I_L) ดังนั้นในการนำผลที่วัดมาเปรียบเทียบกับค่าจำกัดในกรณีคิดแต่ละลำดับ จะต้องทำค่ากระแสที่ตรวจวัดได้ออกมาเป็นค่าจริงของกระแสฮาร์มอนิกในลำนั้นๆก่อน เนื่องจากกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่หลักมูลจะแปรเลี่ยนตามการทำงานของโหลด ดังนั้นจึงไม่นิยมคิดค่าจำกัดของกระแสฮาร์มอนิกในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ของกระแสความถี่หลักมูล (THDi)

เมื่อตรวจวัดในโรงงานให้นำผลของมุมเฟสมาพิจารณาด้วย (ดูผลการหักล้างของฮาร์มอนิกที่เกิดจากแหล่งกำเนิดของโหลดต่างชนิดกันในโรงงาน) ซึ่งมุมเฟสนี้จะต้องอ้างอิงที่จุดเดียวกัน โดยทั่วไปจะเลือกที่จุดตัดผ่านศูนย์ (Zero crossing) ของกระแสความถี่หลักมูลเฟส A เป็นจุดอ้างอิง คุณสมบัติของ CT ก็มีความสำคัญต่อการวัด ซึ่งควรจะมี การลดทอนน้อยกว่า 3 dB สำหรับช่วงความถี่ถึง 3000 เฮิร์ท โดยปกติแล้วคุณสมบัติของ CT จะมีผลกระทบต่อ มุมเฟสของกระแสมากกว่าผลกระทบที่มีต่อขนาดของกระแสฮาร์มอนิก

6.5.3 **ช่วงเวลาในการตรวจวัด** (Monitoring Duration)

จุดสำคัญในการเลือกช่วงเวลาการตรวจวัดคือ จะต้องคลอบคลุมช่วงเวลาการทำงานของอุปกรณ์ที่จะตรวจวัด และจะขึ้นกับคุณลักษณะของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น ถ้าปริมาณฮาร์มอนิกมีลักษณะค่อนข้างคงที่ (Steady state) การตรวจวัดจะใช้เวลาเพียง 24 ชั่วโมง ก็เพียงพอ แต่โดยทั่วไปแล้ว การตรวจวัดควรใช้เวลาอย่างน้อย 1 อาทิตย์ ในช่วงเวลาการทำงานสภาวะปกติของโรงงาน สำหรับโรงงานที่มีคุณลักษณะการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอด เช่น โรงเหล็ก ที่ใช้เครื่องเชื่อมแบบอาร์ค การตรวจวัดแนะนำให้ใช้ช่วงเวลานานๆ

การติดตั้งเครื่องตรวจวัดไว้อย่างถาวร จะสามารถช่วยวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงภายในโรงงานได้ เพราะจะได้ค่าเริ่มต้นของปริมาณฮาร์มอนิกที่อยู่ในสภาวะปกติ และถ้าปริมาณฮาร์มอนิกแปรเปลี่ยนไปจากปกติเราสามารถทำนายได้ว่า มีบางสิ่งเปลี่ยนแปลงในโรงงาน หรือ ในระบบไฟ้ากำลัง เช่น ตัวกรองล้มเหลว มีชุดคาปาซิเตอร์ใหม่ หรือมีโหลดที่กำเนิดฮาร์มอนิกเพิ่มเข้ามาใหม่ เป็นต้น

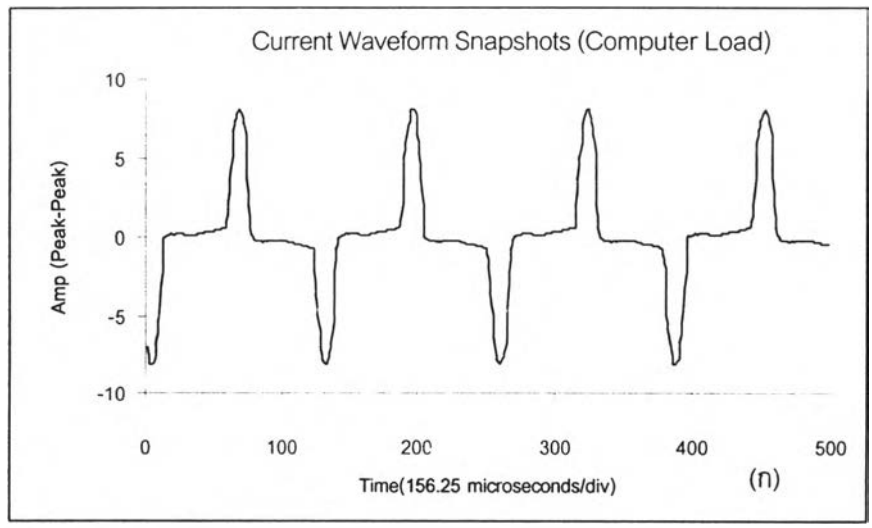
6.5.4 **ช่วงเวลาการวัดตามข้อกำหนดของการไฟฟ้า**

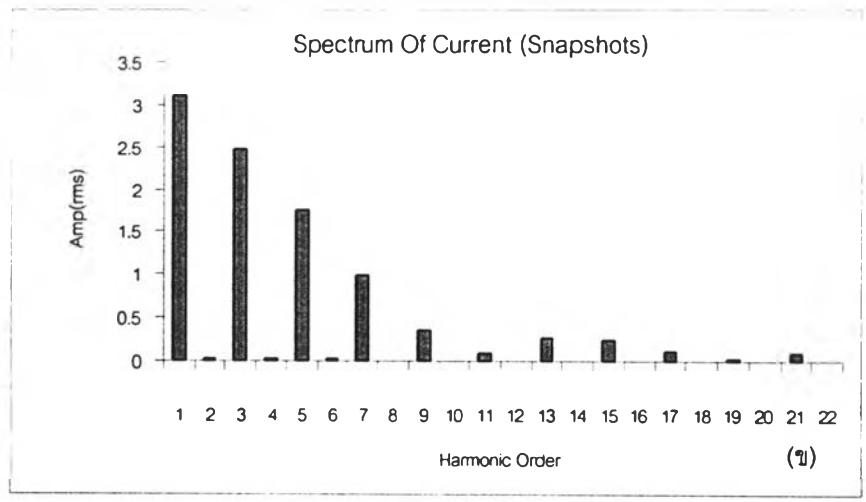
ช่วงเวลาการวัดตามข้อกำหนดของการไฟฟ้า คือ 10 วินาที ต่อการวัดฮาร์มอนิก 1 ครั้ง การวัดซ้ำ จะทำทุกๆ 15 นาที หรือ ครบช่วงเวลาทำงาน ส่วนฮาร์มอนิกที่จะวัด จะทำการวัดตั้ง ลำดับ ที่ 2 ถึงลำดับที่ 19 สำหรับในกรณีที่มีการต่อ ชุดคาปาซิเตอร์เพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า หรือชุดกรองฮาร์มอนิก อยู่ใกล้จุดตรวจวัด จะต้องทำการวัดหลายๆกรณี เพื่อให้ครอบคลุมถึงผลการทำงานของอุปกรณ์เหล่านี้ทุกๆกรณีต่อระดับฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วม

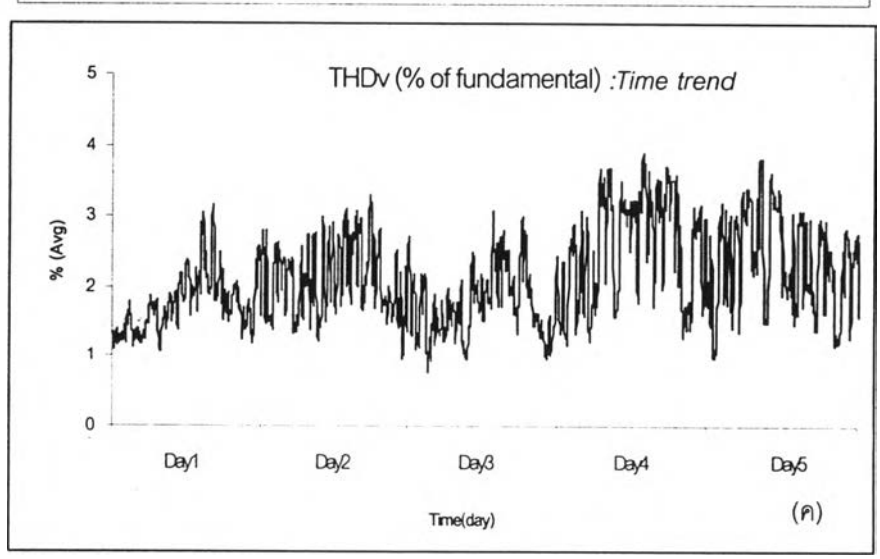
6.5.5 **การนำเสนอผลการตรวจวัด** (Presentation of Measurement Results)

การนำผลการตรวจวัดมาแสดงผลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกทำได้หลายรูปแบบตามวัตถุประสงค์ ซึ่งการแสดงผลหลักๆมีดังนี้

- **รูปถ่าย** (Snapshots) การแสดงผลแบบ Snapshots นี้ เครื่องวัดจะแสดง รูปคลื่นของสัญญาณ และ ขนาดและมุมเฟสของสเปคตรัมฮาร์มอนิก ของต่ละลำดับ ณ เวลาที่ทำการตรวจวัดขณะนั้น ซึ่งค่านี้จะใช้เป็นส่วนป้อนเข้าของกระแสในการจำลองแบบ โดยตรงสามารถกระทำการวิเคราะห์ถึงสภาพฮาร์มอนิกในช่วง โหลดน้อย โหลดปานกลาง และช่วงใช้โหลดเต็มพิกัดได้ ด้วยการเลือกเวลาการทำ Snapshots
- **ค่าที่แปรเปลี่ยนตามเวลา** (Time Trend) การแสดงผลของระดับฮาร์มอนิกที่แปรเปลี่ยนตามเวลา ตลอดช่วงการวัด จะเห็นถึงระดับสูงสุดและ ต่ำสุด ค่าเฉลี่ยของปริมาณฮาร์มอนิก และข้อมูลนี้สามารถใช้สร้างค่าทางสถิติ ของระดับฮาร์มอนิกได้





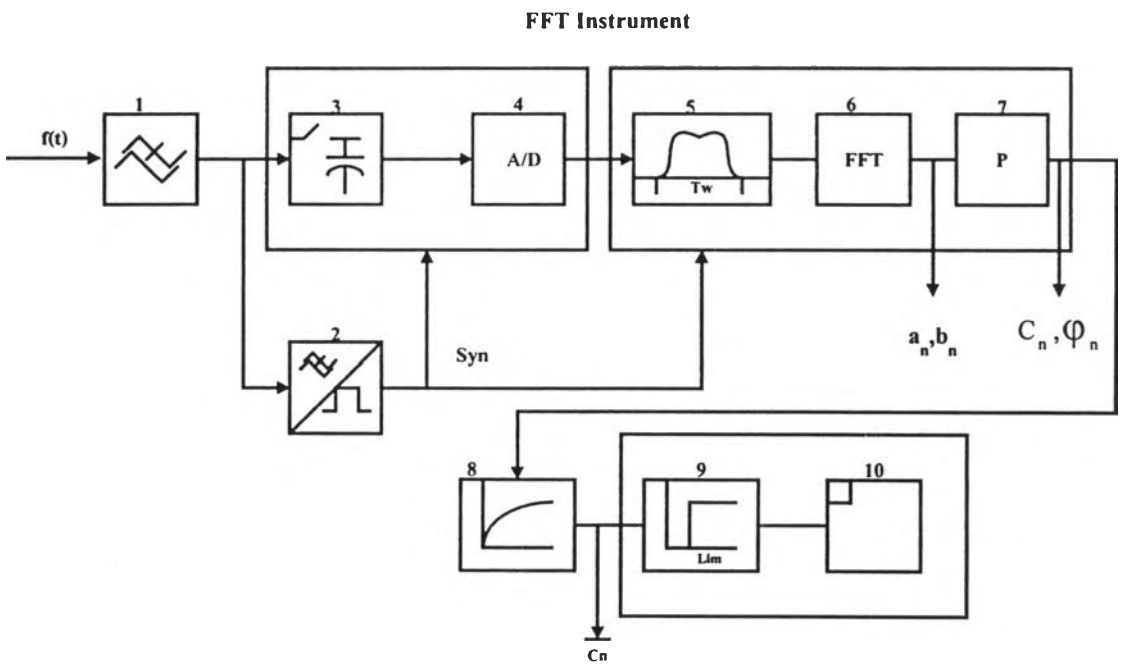


รูปที่ 6.4 ตัวอย่างการแสดงผลการตรวจวัดฮาร์มอนิก

นอกจากนี้ การแสดงผลของการตรวจวัดฮาร์มอนิกยังสามารถแสดงผลอยู่ในลักษณะของแผนภาพ histogram หรือพล๊อตอยู่ในลักษณะของความน่าจะเป็นสะสม (cummulative) เขียนอยู่ในลักษณะของขนาดและเวลา เป็นต้น ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การวิเคราะห์

6.6 เครื่องมือวัดฮาร์มอนิก (Harmonics instrument)

เครื่องมือวัดที่วิเคราะห์ฮาร์มอนิกในปัจุบันส่วนใหญ่แล้วจะใช้หลักการของ FFT ในการแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปความถี่ โครงสร้างของเครื่องมือวัดในส่วนวิเคราะห์ฮาร์มอนิก แสดงดังรูปที่ 6.5



1. Anti-aliasing low-pass filter
2. Synchronization
3. Sample and hold
4. Analogue to Digital converter (A/D)
5. Shape of Window unit
6. FFT Processor
7. Arithmetic Processor
8. Unit for evaluating transitory harmonics
9. Programmable Classifier
10. Counter and Storage

รูปที่ 6.5 ตัวอย่างโครงสร้างของเครื่องวัดฮาร์มอนิกที่ใช้หลักการ FFT

จะเห็นได้ว่าเครื่องมือวัดจะอาศัยการแปลงสัญญาณจากระบบอนานลอกไปเป็นระบบดิจิตอล ด้วยการสุ่ม (Sampling) สัญญาณใน 1 คาบเวลา ดังนั้นลำดับฮาร์มอนิกที่เครื่องมือวัดจะคำนวณได้อย่างถูกต้องถึงฮาร์มอนิกลำดับใดนั้นจะขึ้นกับอัตราการสุ่มสัญญาณ เครื่องมือวัดจะต้องมีความผิดพลาดอยู่ในพิกัดที่ยอมรับได้ เมื่อสัญญาณที่วัดมีการเปลี่ยนแปลง รวมทั้งอุปกรณ์ประกอบ เช่น หม้อแปลงกระแส (CT) และ หม้อแปลงแรงดัน (VT) ตัวอย่างข้อกำหนดความผิดพลาดของเครื่อง

วัดสำหรับสัญญาณที่คงที่ในตารางที่ 6.13 ตามมาตรฐาน IEC-1000-4-7 โดยแบ่งตาม ชนิดของกลุ่มอุปกรณ์

ตารางที่ 6.13 *Maximum measurement errors ตาม IEC 1000-4-7*

Class	*Measurement*	*Conditions*	*Maximum allowable error*
A	Voltage	$U_m \geq 1\%U_N$	$5\%\ U_m$
		$U_m < 1\%U_N$	$0.05\%U_N$
	Current	$I_m \geq 3\%I_N$	$5\%\ I_m$
		$I_m < 3\%I_N$	$0.15\%\ I_N$
B	Voltage	$U_m \geq 3\%U_N$	$5\%\ U_m$
		$U_m < 3\%U_N$	$0.15\%\ U_N$
	Current	$I_m \geq 10\%I_N$	$5\%\ I_m$
		$I_m < 10\%I_N$	$0.5\%I_N$

Note

U_m, I_m = ค่าที่ทำการวัด(measured values)

U_N, I_N = ค่าป้อนเข้าปกติ(nominal input)ของเครื่องวัด

นอกจากนี้การพิจารณาเลือก หม้อแปลงกระแส และ หม้อแปลงแรงดัน ควรเลือกให้ตรงกับข้อกำหนดเรื่องความละเอียดของเครื่องมือวัด โดยรวมแล้วความผิดพลาดไม่ควรเกิน ร้อยละ 5 (5%)

ดังนั้นในเรื่องของมาตรฐานและการตรวจวัดปริมาณฮาร์มอนิกจะต้องคำนึงถึงว่า กำลังตรวจวัดเพื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน หรือ ข้อกำหนดใด เพราะความหมายของดัชนีชี้วัดของแต่ละมาตรฐานอาจต่างกัน เช่น มาตรฐาน IEEE Std.519-1992 จะพิจารณากระแสฮาร์มอนิกผิดเพี้ยนรวมโดยเขียนเป็นสัดส่วนกับค่ากระแสความต้องการสูงสุด (I_L) ดังสมการที่ (3.1) ส่วนมาตรฐาน G.5/3-1976 จะไม่กล่าวถึงค่ากระแสฮาร์มอนิกผิดเพี้ยนรวม แต่ จะพิจารณากระแสฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับ ในกรณีแรงดัน มาตรฐานทั้ง 2 ฉบับจะอ้างอิงถึง แรงดันฮาร์มอนิกผิดเพี้ยนรวม เขียนดังสมการที่ (6.2) เช่นเดียวกัน

ในเรื่องจุดตรวจวัด เพื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานจะต้องพิจารณาที่จุดต่อร่วม ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจุดต่อร่วมจะอยู่ด้านแรงดันไฟฟ้าสูง ดังนั้นถ้าทำการตรวจวัดที่ด้านแรงดันไฟฟ้าต่ำ จะต้องแปลงกลับไปด้านแรงดันไฟฟ้าสูง โดยอัตราส่วนการแปลงของหม้อแปลงด้วย หรือถ้าพิจารณาด้านแรงดันไฟฟ้าต่ำ การเปรียบเทียบจะต้องพิจารณาค่าที่ระดับแรงดันเดียวกันเกี่ยวกับระยะเวลาการตรวจวัดทุกมาตรฐานจะแนะนำให้มีการตรวจโดยครบรอบการทำงานของอุปกรณ์นั้นๆ ส่วนเครื่องมือที่ใช้วัดจะต้องพยามเลือกให้สามารถวัดได้แม่นยำและ ตอบสนองความถี่ได้ดีในช่วงกว้าง