

CAPITULO 4

NORMAS (GUIAS) SOBRE LIMITES DE ARMONICAS EN REDES ELECTRICAS

4.1 PROPÓSITO DE LOS ESTÁNDARES

El propósito de las guías y estándares relacionados con la limitación de las armónicas en los sistemas eléctricos de potencia puede resumirse en la necesidad de [1]:

- i) Controlar la distorsión de tensión y corriente a niveles que los equipos conectados al sistema puedan tolerar.
- ii) Garantizar que los clientes tendrán una tensión con una forma adecuada a sus necesidades.
- iii) Limitar el nivel de distorsión que un cliente puede introducir a la red.
- iv) Asegurar que las armónicas no interfieran con otros sistemas, tales como los sistemas telefónicos.

4.2 OBSERVACIONES GENERALES

- Los estándares de los diversos países son muy variados entre sí y son el resultado de la experiencia que los investigadores han recogido al analizar el problema de las armónicas.
- Las características de las redes eléctricas y de los consumidores en los diferentes países son, en general, bastante diferentes y por tal razón los estándares sobre armónicas no son directamente comparables.
- Al observar más detalladamente los estándares, se verá que existen criterios sumamente dispares para enfrentar y resolver una misma situación.
- En general, un estándar es el resultado de un acuerdo entre las diferentes partes involucradas.
- En los diferentes países, los estándares tienen generalmente el carácter de recomendación [2] o "práctica recomendada" [3].
- Todos los estándares consideran límites en la distorsión armónica total de tensión y la mayoría de ellos limita las armónicas individuales de tensión.
- Los convertidores estáticos son, sin duda, algunos de los principales contaminantes y, por esa razón, algunas normas fijan un procedimiento o criterio para determinar el tipo y la potencia del convertidor que puede ser conectado al sistema. Un criterio para resolver este problema es llamado "first come, first served", el que permite la conexión de cargas contaminantes en un determinado lugar hasta que no se sobrepasen los límites del sistema.

Con este método, los que llegan primero pueden contaminar más que los consumidores que se conectan después. Incluso puede darse el caso de que un solo consumidor complete la capacidad de contaminación del sistema, impidiendo la conexión de otras cargas contaminantes. Este criterio es usado en Gran Bretaña. Otro criterio, establece que cada consumidor puede inyectar armónicas al sistema en proporción a la potencia que demanda. Este criterio es empleado por Nueva Zelanda y Alemania.

4.3. VARIABLES LIMITADAS POR ESTÁNDARES

Los estándares o recomendaciones establecen límites para las siguientes variables.

- Armónicas individuales de tensión (valor efectivo ó RMS).
- Armónicas individuales de corriente. (valor efectivo ó RMS).
- Distorsión armónica total de tensión o de corriente, definida por la ecuación:

$$\text{THD} = 100 * \frac{\sqrt{\sum_{h=2} V_h^2}}{V_1} \quad [4.1]$$

donde V_1 es la tensión fundamental (o corriente fundamental) y V_h tensión (o corriente) de la armónica h-ésima.

- Factor de influencia telefónica TIF (Telephone Influence Factor) y producto I*T.
- Tipo de convertidor que puede ser conectado.

4.4 REVISIÓN DE ALGUNOS ESTÁNDARES

4.4.1 ALEMANIA FEDERAL [2]

- Aspectos básicos de las recomendaciones alemanas:
 - i) Una carga no puede generar más armónicas que las estrictamente necesarias para el cumplimiento de sus propósitos técnicos. Esto significa que debe buscarse, considerando adecuadamente los costos, aquella solución que genere la menor cantidad de armónicas.
 - ii) Cada cliente puede inyectar corrientes armónicas a la red en proporción a su potencia. Esto significa que un consumidor de mayor potencia puede inyectar más armónicas.
 - iii) No son admisibles aparatos que inyectan corriente continua a la red, como por ejemplo rectificadores trifásicos estrella catódica sin transformador de entrada.
- El "nivel aceptable" para las armónicas de tensión U_ν (U: tensión, ν : orden de la armónica) está definido por las curvas de la figura 4.1.

En esta figura se establecen distintos niveles para las armónicas impares no divisibles por 3 (curva 1), para las armónicas impares divisibles por 3 (curva 2) y para las armónicas pares (curva 3).

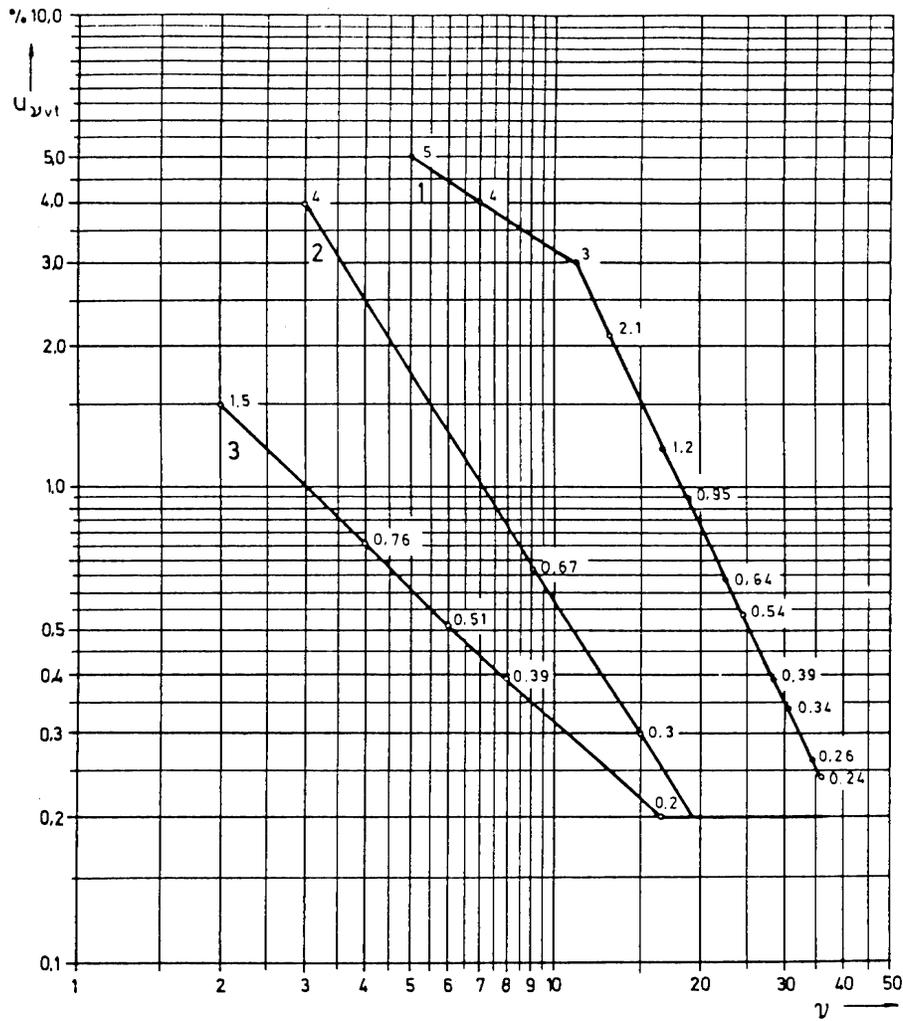


Fig. 4.1. Nivel aceptable para las armónicas de tensión, según el estándar alemán.

- Curva 1: Armónicas impares no divisibles por 3.
- Curva 2: Armónicas impares divisibles por 3.
- Curva 3: Armónicas pares.

- La suma ponderada de las armónicas debe cumplir.

$$\sum_{v=2}^{40} v^2 * u_v^2 < 0,5 \quad [4.2]$$

- Tensión armónica admisible que puede ser generada por un cliente individual:

$$u_{vzul} = \frac{u_v * k_N * k_A}{k_{\Gamma esv}} \quad [4.3]$$

donde:

u_v : Tensión de la armónica v-ésima referida a la fundamental.

u_{vzul} : Tensión armónica admisible para un cliente individual.

k_N : Factor de nivel de tensión

k_A : Factor de conexión (o de potencias).

$k_{\Gamma esv}$: Factor de resonancia

NIVEL DE TENSIÓN	$v = 3n \pm 1$ = 2,4,5,7,8	$v = 3n$ = 3,6,9...
Alta Tensión	0,1...0,3	-
Media Tensión	0,4...0,7	-
Baja Tensión	0,2...0,3	1,0

Tabla 4.1. Factor de nivel de Tensión k_N

El factor de conexión k_A se obtiene de la relación:

$$k_A = \frac{S_{consumida}}{S_N} \quad [4.4]$$

donde:

$S_{consumida}$: Potencia demandada por el cliente.

S_N : Potencia nominal de la red. Esta potencia puede ser igual a la potencia del transformador que alimenta a la barra.

Una desventaja de la tensión armónica admisible, definida por la ecuación 4.3 , es que ésta no puede ser medida directamente. Para superar este inconveniente, es posible calcular a partir de la ecuación 4.3, la potencia de un convertidor equivalente

para el cual se pueden determinar las corrientes armónicas. Estas corrientes armónicas pueden ser medidas experimentalmente.

4.4.2 SUECIA

En el documento "SEF Thyristor Committee Report" se limita la capacidad de convertidores en sistemas de tensiones de hasta 24 KV como sigue...

NÚMERO DE PULSOS	PORCENTAJE DE LA CAPACIDAD DE CORTOCIRCUITO DEL SISTEMA (%)
< 6	0.5
6	1.0
12	2.0
> 12	3.0

Tabla 4.2. Capacidad de convertidores que pueden ser conectados

Las restricciones para la distorsión armónica total (THD) dependen de la tensión del sistema de acuerdo a la siguiente tabla:

TENSIÓN DEL SISTEMA	PORCENTAJE THD (%)
430 /250 V	4.0
3.3 kv a 24 kV	3.0
Hasta 84 kV	1.0

Tabla 4.3. Distorsión armónica total (THD).

4.4.3 ESTADOS UNIDOS

En Estados Unidos los límites de armónicas están establecidos por el estándar IEEE Std 519 del año 1992 (revisión de IEEE Std 519 del año 1981), titulado "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System".

- RECOMENDACIONES DADAS POR IEEE

(1) La adherencia estricta a estas recomendaciones no siempre evitaría problemas, particularmente cuando son aproximados a los límites. Es razonable considerar que el sistema cambia a menudo, justificando una nueva examinación. Mediciones de armónicas deberían ser ejecutadas de vez en cuando, para determinar el comportamiento del sistema y el rendimiento de los equipos. El cliente debería confirmar:

- Que condensadores para corregir el factor de potencia o filtros de armónicas no sean sobrecargados por un exceso de armónicas.
- Que las perjudiciales resonancias series o paralelas, no están presentes.
- Que el nivel de armónicas en PCC y en los puntos de utilización no sea excesivo.

(2) Los límites mostrados en las tablas de distorsión de corriente deben ser usados como valores de “peor caso” para operaciones normales (condiciones válidas por más de 1 hora). Para períodos cortos, durante partidas o condiciones inusuales, los límites pueden ser excedidos en un 50 %.

- LÍMITES DE DISTORSIÓN DE CORRIENTE

Las tablas 4.4, 4.5 y 4.6 son aplicables para rectificadores de 6-pulsos y situaciones generales de distorsión. Sin embargo, cuando se usan convertidores con número de pulsos (q) de más de 6, los límites para las armónicas características son incrementados por un factor equivalente a: $\sqrt{\left(\frac{q}{6}\right)}$, con tal que las amplitudes de las armónicas no-características sean menores que el 25 % de los límites especificados en las tablas.

ARMONICAS INDIVIDUALES (IMPARES)						
I _{sc} /I _L	h<11	11<=h<17	17<=h<23	23<=h<35	35<=h	THD
<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

Tabla 4.4. Límite de distorsión de corriente para Sistemas

de Distribución General (de 120 [V] a 69 [KV])

ARMONICAS INDIVIDUALES (IMPARES)						
I_{sc}/I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	THD
<20	2.0	3.5	0.75	0.3	0.15	2.5
20-50	3.5	2.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50-100	5.0	2.25	2.0	0.75	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

Tabla 4.5. Límite de distorsión de corriente para Sistemas de Subtransmisión General (de 69.001 [KV] a 161 [KV])

ARMONICAS INDIVIDUALES (IMPARES)						
I_{sc}/I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	THD
<50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥ 50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

Tabla 4.6. Límite de distorsión de corriente para Sistemas de Transmisión General (> 161[KV])

Las siguientes observaciones rigen para las tablas 4.4, 4.5 y 4.6:

- Las armónicas pares están limitadas al 25% de los valores para armónicas impares mostrados en las tablas.
- No son admisibles distorsiones de corriente que generen corriente continua.
- I_{sc} : Máxima corriente de cortocircuito en el PCC. El PCC es el punto de acoplamiento común (Point of Common Coupling) y corresponde al lugar en que se interconectan el convertidor (carga no lineal) con los otros consumidores.
- I_L : Máxima corriente demandada por la carga en el PCC (componente de frecuencia fundamental).

- LÍMITES DE DISTORSIÓN DE VOLTAJE PARA DISTRIBUIDOR

VOLTAJE BUS A PCC	DISTORSIÓN INDIVIDUAL DE VOLTAJE [%]	DISTORSIÓN TOTAL DE VOLTAJE [%]
69 [KV] y menos	3.0	5.0
69.001 [KV] a 161 [KV]	1.5	2.5
161.001 [KV] y más	1.0	1.5

Tabla 4.7 Límites de distorsión de voltajes IEEE Std. 519 - 1992

4.4.4 FINLANDIA

A través del documento "Restriction of harmonics in Electrical Networks" se coloca límites a la distorsión armónica total permitida y a niveles de armónicas individuales en el punto de conexión.

TENSIÓN DEL SISTEMA	THD DE TENSIÓN (%)	NIVEL DE ARMÓNICAS INDIVIDUALES (%)
1 kV	5	4
3 - 20 kV	4	3
30 - 45 kV	3	2
110 kV	1.5	1

Tabla 4.8. Límites de armónicas para tensión.

En este documento también se imponen límites al nivel de armónicas de corriente que pueden circular en alguna conexión a algún consumidor. Los límites no están expresados como niveles de corriente absolutos, sino que como un porcentaje de una corriente de referencia del consumidor. Esta corriente de referencia se calcula de la potencia media horaria del consumidor (P_c) y la tensión nominal del sistema (U_n) como:

$$I_{ref} = \frac{P_c}{\sqrt{3}U_n} \quad [4.5]$$

Los límites obtenidos son los siguientes:

TENSIÓN DEL SISTEMA	THD DE CORRIENTE (%)	CORRIENTE ARMÓNICA INDIVIDUAL (%)
3 - 20 kV	10	8
30 - 45 kV	7	6
110 kV	5	4

Tabla 4.9. Límites de armónicas de corrientes.

Para la capacidad de los equipos convertidores que es posible conectar en un sistema, este estándar también emplea como un valor de referencia la capacidad de cortocircuito del sistema en el punto de conexión, siendo los valores expresados en porcentaje, según aparece en tabla 4.10.

NÚMERO DE PULSOS	TENSIÓN DEL SISTEMA 20 kV	TENSIÓN DEL SISTEMA 30 kV
< 6	0.5	-
6	1	0.5
12	2	1
> 12	3	2

Tabla 4.10. Potencia del convertidor como porcentaje de la potencia de cortocircuito.

4.4.5 LA NORMA IEC 555-2

En el pasado los equipos de baja potencia no encontraban prácticamente ninguna limitación para conectarse a la red. Esto permitió que equipos como televisores se conectaran indiscriminadamente a la red, generando una importante cantidad de armónicas. Para corregir esta situación, la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC, por su nombre en inglés) puso en vigencia a partir de 1995 la norma IEC 555-2, destinada precisamente a los equipos de baja potencia.

Esta norma define la categoría de equipos clase D, que son todos aquellos equipos que tienen una corriente de entrada contenida dentro de la “forma de onda especial” mostrada en la figura 4.2.

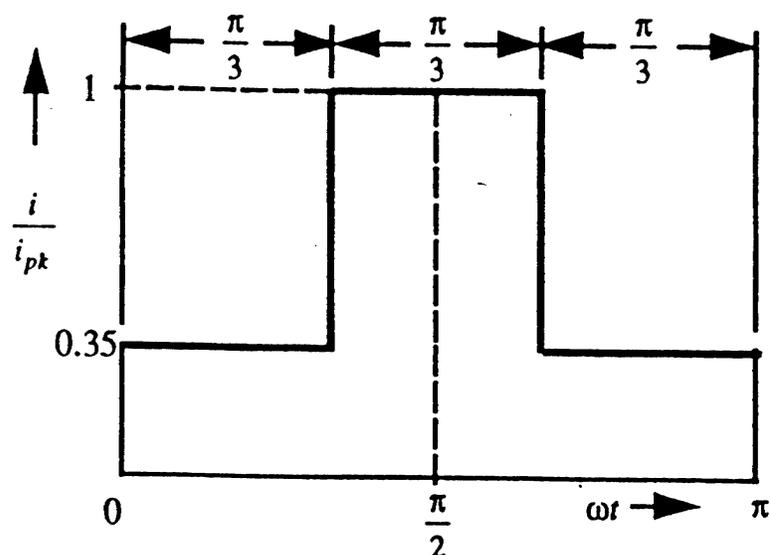


Fig. 4.2. Forma de onda especial definida para los equipos clase D.

Esta definición está claramente dirigida a los equipos que tienen un rectificador con filtrado capacitivo.

Los equipos clase D pueden inyectar las corrientes armónicas mostradas en la tabla 4.11.

ORDEN DE LA ARMÓNICA (n)	INTENSIDAD ARMÓNICA MÁXIMA ADMISIBLE (A)
ARMÓNICAS IMPARES	
3	2,30
5	,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21
$15 \leq n \leq 39$	$0,15 \cdot 15/n$
ARMÓNICAS PARES	
2	1,08
4	0,43
6	0,30

$8 \leq n \leq 40$	$0,23.8/n$
--------------------	------------

Tabla 4.11 Límites de corrientes armónicas para equipos clase D.

La aplicación de estos límites trae como consecuencia que un rectificador puente monofásico de diodos, con un factor de cresta $FC=8$ ($FC = \text{corriente máxima/corriente efectiva}$), $THD = 133\%$ y factor de potencia $FP = 0,6$ pueda quedar claramente fuera de norma, tal como se aprecia en la figura 4.3 [5].

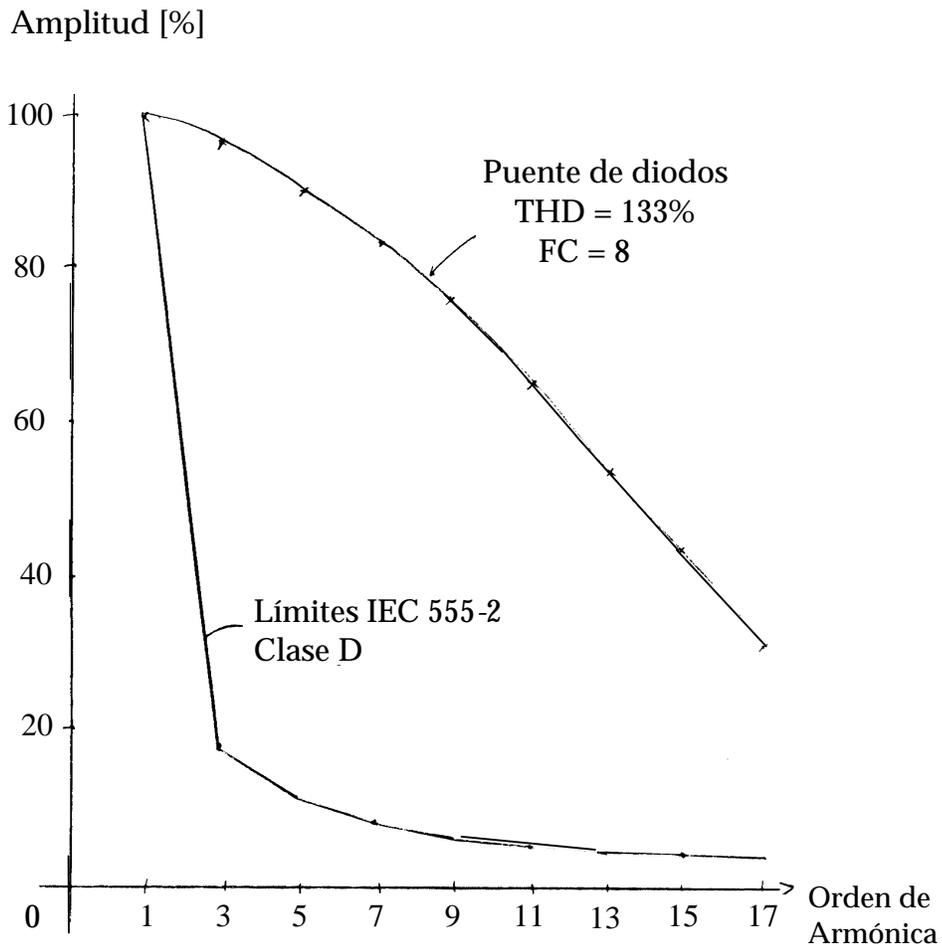


Fig. 4.3 Armónicas de un rectificador puente convencional con filtrado capacitivo, comparado con el límite de la norma IEC 555-2 para equipos clase D.

4.4.6 LA NORMA CHILENA

Respecto al escenario futuro, en el documento Proyecto de Reglamento de la Ley General de Servicios Eléctricos, elaborado por la Comisión Nacional de Energía, versión marzo-95, se establece en el TITULO IX: DISPOSICIONES TRANSITORIAS, pág. 57-61:

- ARMÓNICAS DE VOLTAJE

En condiciones normales de operación, se deberá cumplir para un período de registro de mediciones de una semana cualquiera del año o de siete días consecutivos que : el 95% de los valores estadísticos de los voltajes armónicos y de su índice de distorsión total, cumplen con lo indicado en la tabla siguiente. El valor estadístico de los voltajes armónicos y de su índice de distorsión es obtenido para cada intervalo de diez minutos, como resultado de evaluar estadísticamente un conjunto de mediciones efectuadas en dicho intervalo, de acuerdo a lo establecido en la norma correspondiente.

ARMÓNICAS IMPARES NO MÚLTIPLO DE 3			ARMÓNICAS IMPARES MÚLTIPLO DE 3			PARES		
Orden	Armónica voltaje (%)		Orden	Voltaje (%)		Orden	Voltaje (%)	
	<= 110 kV	> 110 kV		<= 110 kV	> 110 kV		<= 110 kV	> 110 kV
5	6	2	3	5	2	2	2	1.5
7	5	2	9	1.5	1	4	1	1
11	3.5	1.5	15	0.3	0.3	6	0.5	0.5
13	3	1.5	21	0.2	0.2	8	0.5	0.2
17	2	1	>21	0.2	0.2	10	0.5	0.2
19	1.5	1				12	0.2	0.2
23	1.5	0.7				>12	0.2	0.2
25	1.5	0.7						
>25	0.2+1.3*25/h	0.2+0.5*25/h						

Tabla 4.12. Armónicas de voltaje, permitidas por la norma chilena.

Al aplicar la estadística del 95% a los valores registrados del índice de distorsión total armónica, se debe cumplir, para un registro de mediciones de una semana cualquiera del año o de siete días consecutivos y para tensiones iguales o inferiores a 110 kV, que este índice deberá ser inferior a 8% ($THD_V < 8\%$).

Al aplicar la estadística del 95% a los valores registrados del índice de distorsión total armónica, se debe cumplir, para un registro de mediciones de una semana cualquiera del año o de siete días consecutivos y para tensiones superiores a 110 KV,

que este índice deberá ser inferior a 3% ($THD_V < 3\%$), y se calculará de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\text{Índice de distorsión total} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{k=50} V_k^2}}{V_1} \quad [4.6]$$

- ARMÓNICAS DE CORRIENTE

MÁXIMA DISTORSIÓN DE ARMÓNICA DE CORRIENTE EXPRESADA COMO % DE LA FUNDAMENTAL						
ORDEN DE LA ARMÓNICA (ARMÓNICAS IMPARES)						
I_{SC}/I_L	<11	11<=H<17	17<=H<23	23<=H<35	35<H	Índice DI
<=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

Las armónicas pares están limitadas al 25% de los límites establecidos para las armónicas impares.

Todos los equipos de generación de potencia están limitados a los valores indicados de distorsión armónica de corriente, independiente de la razón I_{SC}/I_L .

Donde:

I_{SC} = Máxima corriente de cortocircuito en el Punto Común de Conexión (PCC).

I_L = Corriente nominal de carga (a frecuencia fundamental) en el PCC.

- Para el caso de Clientes en Puntos Comunes de Conexión comprendidos entre 69 kV y 154 kV, los límites son el 50% de los límites establecidos en la Tabla.
- Para el caso de Clientes en PCC superiores a 154 kV se aplicarán los límites de 110 kV en tanto el Ministerio a proposición de la Comisión no fije la norma respectiva.

Tabla 4.13. Corrientes armónicas permitidas por la norma chilena.

Las armónicas pares están limitadas al 25% de los límites establecidos para las armónicas impares.

El índice de distorsión de corriente se calculará según la expresión:

$$\text{Índice de distorsión total} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{k=50} I_k^2}}{I_1} \quad [4.7]$$

REFERENCIAS

- [1] J. Arrillaga, D. Bradley, P. Boager, Power System Harmonics. John Wiley and Sons. 1985
- [2] Grundsätze für die Beurteilung von Netzrückwirkungen. Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke, Alemania Federal, 1987.
- [3] Ch. Duffey, R. Stratford, Update of Harmonic Standard IEEE-519: IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 25 , N 6 , Nov.-Dec. 1989, Págs. 1025 - 1034
- [4] J. González, Estudio de Armónicas en un sistema eléctrico de potencia. Trabajo de Titulación, Ingeniero Civil Electricista, Universidad Técnica Federico Santa María 1989.
- [5] D. Divan, G. Venkataramanan, Ch. Chen, “A Unity Power Factor Forward Converter”. Conference Record of the IEEE/IAS 1992 Annual Meeting, USA, pp. 666-672.