



Estudio de las características de los aceros utilizados en la construcción de los transformadores de potencia

Orestes Hernández
Reinel Valido

Recibido: Febrero del 2004
Aprobado: Abril del 2004

Resumen / Abstract

En este trabajo se presenta el resultado de las investigaciones realizadas para estudiar las características de los aceros utilizados en la construcción de los transformadores de distribución. Para ello se empleó el método de comparación económica de los valores de capitalización de las pérdidas activas en los equipos. Se realizó un gran número de proyectos utilizando el software DISTRANS desarrollado en el grupo de Alta Tensión del CIPEL y se contrastaron los valores de los parámetros eléctricos y el reflejo de estos en el valor financiero del transformador.

Palabras clave: transformadores, parámetros magnéticos de los transformadores

This work presents the results of the investigations made to study on the characteristics of steel used in the construction of power transformers. To carry out this study it was used the economic comparison method of the active losses capitalization values in the equipments. Many projects were making to contrast the values of its electrical parameters and its reflex in the financial values of the transformers.

Key words: transformers, magnetic parameters of transformers

INTRODUCCIÓN

Desde el año 1997 la Unión Eléctrica de Cuba publicó sus "Especificaciones técnicas para transformadores monofásicos de distribución",¹ la cual mostraba valores en sus parámetros eléctricos que eran el resultado de un promedio de los valores que habitualmente exhibían los transformadores importados por el país.

En 1998 estas especificaciones fueron revisadas después de dos interventorías y dos inspecciones técnicas realizadas a cuatro fábricas de transformadores en Colombia, por tres especialistas cubanos.

Esta reconsideración estuvo motivada por una diferencia apreciable que existía entre los valores especificados por Cuba y los que podían suministrar los fabricantes, quienes superaban sustancialmente en calidad, las exigencias.

Después de un estudio realizado, en el cual primó como principio esencial; el peso económico y de operación que tendría para el Sistema Electroenergético Nacional, los niveles de impedancia de cortocircuito, pérdidas y corriente de excitación permitidos en los transformadores a importar o fabricar

en Cuba y el nivel o estado de la técnica y tecnología de obtención de materiales y componentes, así como de la propia manufactura de estos equipos, se publicó la primera revisión de las "Especificaciones técnicas para transformadores monofásicos de distribución".²

El resultado de esta revisión fue una reducción sustancial de los límites de pérdidas y corriente de excitación que se exigían para estos equipos.

A partir del 1998 se han utilizado estas especificaciones como documento técnico de referencia para realizar licitaciones de importación de transformadores monofásicos de distribución. Desde ese momento, todo fabricante interesado en vender estos tipos de transformadores a Cuba se vio obligado a cumplir con sus exigencias.

Desde el año 2001, se han confrontado algunas dificultades con un suministrador de núcleos magnéticos, que comenzó a tener inestabilidad en la calidad de sus productos, obligando a la Fábrica de Transformadores Latino a realizar algunas reclamaciones al mismo.

Su mayor inestabilidad radicaba en el no cumplimiento de los valores límites de corriente de excitación para los núcleos magnéticos, sobre todo, de transformadores de baja capacidad nominal, específicamente de 10 y 15 kVA.

Ante los cuestionamientos que se han hecho sobre la importancia de fijar los límites de corriente de excitación o vacío en esos niveles, se decidió realizar un estudio sobre los mismos que pudiera justificar la pertinencia de estos valores.

CRITERIOS DE ECONOMÍA

Generalidades

Dentro de las construcciones eléctricas, el transformador constituye uno de los productos susceptibles de estudio matemático más preciso. Su simplicidad estructural y la homogeneidad de los circuitos eléctricos y magnéticos, incluidos los de dispersión, ofrecen facilidades para el cálculo técnico-económico.³

Entre los métodos útiles para evaluar económicamente variantes u ofertas técnicas se encuentran:

a) El método de los gastos sociales o gastos reducidos.

b) El método de capitalización de las pérdidas.

Se empleó el método de capitalización de las pérdidas

por resultar más actual con los principios y técnicas de economía que se están manejando por las empresas en estos tiempos.

Cálculo de los costos del transformador por el método de capitalización de las pérdidas

$$Ct = Cpo + Cpcc \quad \dots(1)$$

donde:

Ct: Costo total de la oferta de transformadores (USD).

Cpo: Costo de las pérdidas de vacío capitalizadas (USD).

Cpcc: Costo de las pérdidas de carga capitalizadas (USD).

$$Cpo = Po \cdot 8\,760 \cdot Cu \cdot (Fc)^2 \cdot Y \cdot Nt \cdot 10^{-6} \cdot 115 \cdot 0,28 / (1^{0,0735}) / (1^{0,184}) \quad \dots(2)$$

$$Cpcc = Pcc \cdot 8\,760 \cdot Cu \cdot (Fc)^2 \cdot Y \cdot Nt \cdot 10^{-6} \cdot 115 \cdot 0,28 / (1^{0,0735}) / (1^{0,184}) \quad \dots(3)$$

donde:

Po: Pérdidas activas de vacío del transformador (W).

Pcc: Pérdidas activas de carga del transformador (W).

8 769: Horas de un año (h).

Cu: Coeficiente de utilización del transformador anualmente, se puede considerar 0,95.

Fc: Factor de carga del transformador, S/Sn (se tomará 0,45, similar a 4 000 h de tiempo equivalente).

Nt: Cantidad de transformadores de la oferta.

10⁻⁶: Factor de corrección para llevar de watt a kilowatt y de kilogramo a tonelada.

115: Precio ponderado de la tonelada equivalente de combustible (USD).

0,28: Consumo específico ponderado de combustible por kilowatt hora (kWh) generado (kg/kWh).

0,073 5: Factor de pérdidas por uso propio en subestaciones (7,35 %).

0,184: Factor de pérdidas en transmisión y distribución (18,4 %).

Y: Valor de la cantidad de dinero para capitalizar las pérdidas.

La capitalización de las pérdidas es el valor en dinero que se necesita disponer y depositar en un banco hoy para utilizarlo anualmente por concepto de pérdidas de energía durante el tiempo previsto para la amortización del transformador. Se obtiene multiplicando el costo anual de las pérdidas por el factor de capitalización Y, o sea, el valor presente que equivaldría al desembolso de un dólar (USD) cada año

durante t años, teniendo en cuenta el interés, r , bancario en porcentaje de dinero. Este factor viene dado por la expresión:

$$Y = 100 / r [1 - 1 / (1 + r / 100)^t] \text{ USD presente / USD anual} \quad \dots 4$$

Para 20 años de vida útil con una tasa de interés bancaria del 8 % (Bancos de Cuba), $Y = 9,82$.

DESARROLLO

Generalidades

Para llevar a cabo esta investigación^{4,5} se empleó un software para cálculo optimizado de transformadores de distribución llamado **DISTRANS** desarrollado en el grupo de alta tensión del CIPEL. (Ver figura 1.)

Con este programa se realizó un gran número de proyectos de equipos de 10, 15, 25, 37.5 y 50 kVA de 7620 / 240 V.

Estos diseños se ejecutaron con las siguientes premisas:

a) Manteniendo la misma parte activa y densidad de flujo y variando la calidad del acero.

b) Manteniendo las dimensiones del núcleo y calidad del acero y variando la densidad de flujo.

c) En este software se encuentran curvas de características de los aceros electrotécnicos más utilizados en la actualidad en la construcción de transformadores de potencia.

d) Las curvas en cuestión son las de pérdidas de vacío específicas (por kilogramo de peso del núcleo magnético) y las de volt-amperes de excitación específicos contra densidad de flujo máxima.⁵ Ver tablas de la 1 a la 5.



TABLA 1

M3 - 0,23 mm		
B (T)	Po (W/kg)	VAexc/kg
1,10	0,450	0,570
1,20	0,530	0,670
1,30	0,620	0,780
1,40	0,740	0,977
1,50	0,870	1,237
1,60	1,043	1,732
1,70	1,314	3,132
1,80	1,769	9,313

TABLA 2

M3- 0,27 mm		
B (T)	Po (W/kg)	VAexc/kg
1,20	0,660	0,750
1,25	0,700	0,820
1,30	0,760	0,880
1,35	0,820	0,980
1,40	0,890	1,050
1,45	0,980	1,200
1,50	1,050	1,330
1,55	1,150	1,500
1,60	1,250	1,800
1,65	1,400	2,300
1,70	1,550	3,000
1,75	1,750	5,000
1,80	1,900	8,500

TABLA 3		
M3-0,30 mm		
B (T)	Po (W/kg)	VAexc/kg
1,10	0,580	0,680
1,20	0,680	0,800
1,30	0,800	0,960
1,40	0,940	1,100
1,50	1,100	1,380
1,60	1,300	1,850
1,70	1,580	3,000
1,80	1,900	8,000

TABLA 4		
M4-0,27 mm		
B (T)	Po (W/kg)	VAexc/kg
1,30	0,820	0,920
1,40	0,900	1,050
1,45	1,020	1,200
1,50	1,080	1,300
1,55	1,200	1,600
1,60	1,310	1,850
1,65	1,450	2,800
1,70	1,600	3,150
1,80	2,000	8,600

Como resultados más importantes se obtuvieron, las corrientes de vacío (I_0), pérdidas activas de vacío P_o , costos capitalizados de estas pérdidas y pérdidas reactivas de vacío (Q_o).

Hipótesis

En la práctica ingenieril existen los siguientes criterios:
1. Existe una relación directa cuantificable entre las corrientes de vacío y las pérdidas activas de vacío en los transformadores.

2. La calidad de los tipos de aceros empleados actualmente para la construcción de los núcleos magnéticos, de acuerdo con los niveles de pérdidas y corrientes de vacío, decrece en el siguiente orden, según la denominación empleada:

MOH - 0,23 mm, MOH - 0,27 mm, M3 - 0,23 mm, M3 - 0,27 mm, M3 - 0,30 mm, M4 - 0,27 mm, M4 - 0,30 mm.

Mediante las corridas que se realizaron se pudo obtener un gran número de diseños con los cuales se logró comparar los valores de los parámetros relacionados con el circuito magnético del transformador, estos evidenciaron que las hipótesis que fueron punto de partida de este trabajo, no eran ciertas.

Algunos de los resultados de las corridas se muestran en las tablas de la 6 a la 10.

Análisis de los resultados

Con el MOH-0,27 mm se obtiene menores I_0 para la misma densidad de flujo.

Las P_o en el MOH-0,27 mm son ligeramente mayores a las del MOH-0,23 mm y M3-0,27 mm, pero las Q_o son sustancialmente menores. La componente reactiva de pérdidas y corriente de vacío son ligeramente menores a las componentes activas en el MOH-0,27 mm.

El MOH-0,27 mm a partir de 1,65 t tiene iguales P_o al M3-0,23 mm pero menores Q_o .

En general el M3-0,23 mm tiene menores P_o que el M3-0,27 mm y M3-0,30 mm pero tiene mayor I_0 que ambos y mayores Q_o .

TABLA 5		
M4-0,30 mm		
B (T)	Po (W/kg)	VAexc/kg
1,10	0,585	0,680
1,20	0,700	0,785
1,30	0,820	0,940
1,40	0,965	1,100
1,50	1,140	1,380
1,60	1,350	1,850
1,70	1,620	3,150
1,80	2,000	8,400

El M3-0,27 mm es mejor en todos los sentidos al M3-0,30 mm.

El M3-0,23 mm tiene menores P_o que el MOH-0,27 mm pero mayores Q_o e I_o .

El acero M4 tiene peores P_o , I_o y Q_o que las demás calidades de acero.

El M4-0,30 mm aunque tiene P_o ligeramente mayor que las del M4-0,27 mm, tiene una Q_o e I_o sustancialmente menores.

En todos los transformadores existe la tendencia a consumir menos reactivo y corriente de excitación a medida que aumenta el espesor de la lámina.

Esta observación fue uno de los resultados más importantes alcanzados en este trabajo porque plantea una definición que contradice, lo que hasta la fecha era considerado en la práctica, en cuanto a que a menor espesor de la lámina del acero, siempre habría menor corriente de vacío en los transformadores, cuando en la realidad no es así.

También está demostrado que a medida que aumenta el espesor de las láminas aumentan las corrientes

parásitas en ella y de hecho las pérdidas de vacío, téngase en cuenta que, como se sabe:⁶

$$P_p = e (M I r) B^2 f^2 t^2 \quad \dots(5)$$

donde:

τ : Espesor de la lámina de acero.

Aquí se puede ver que estas pérdidas dependen cuadráticamente del espesor τ .

TABLA 7
Transformadores de 15 kVA

Tipo de acero	B (T)	Po (W)	Cpo (USD)	Io (A)	Qo (VAR)
MOH 0,23mm	1,65	60,22	209,60	0,40	75,07
M3 0,23mm	1,65	64,60	224,85	0,61	131,64
MOH 0,27mm	1,65	65,67	228,57	0,37	59,77
MOH 0,23mm	1,73	69,61	243,33	0,59	123,14
M3 0,27mm	1,65	76,58	266,55	0,59	119,10
M3 0,30mm	1,65	78,86	274,48	0,61	122,77
M4 0,27mm	1,65	79,43	276,47	0,70	147,49
M4 0,30mm	1,65	81,30	282,98	0,63	126,63

TABLA 8
Transformadores de 25 kVA

Tipo de acero	B (T)	Po (W)	Cpo (USD)	Io (A)	Qo (VAR)
MOH 0,23mm	1,67	79,66	277,27	0,56	108,24
M3 0,23mm	1,67	86,12	299,75	0,86	181,57
MOH 0,27mm	1,67	86,66	301,63	0,50	82,31
MOH 0,23mm	1,76	96,99	337,59	0,96	208,99
M3 0,27mm	1,67	100,6	350,33	0,82	169,11
M3 0,30mm	1,67	104,5	363,83	0,84	172,38
M4 0,27mm	1,67	105,5	367,24	0,93	196,69
M4 0,30mm	1,67	107,5	374,34	0,88	180,37

TABLA 6
Transformadores de 10 kVA

Tipo de acero	B (T)	Pc (W)	Cpo (USD)	Io (A)	Qo (VAR)
MOH 0,23mm	1,63	47,2	164,29	0,30	54,37
M3 0,23mm	1,63	49,43	172,05	0,43	90,59
MOH 0,27mm	1,63	51,69	179,91	0,29	46,61
MOH 0,23mm	1,69	53,29	185,48	0,4	79,85
M3 0,27mm	1,63	59,57	207,34	0,42	81,31
M3 0,30mm	1,63	61,59	214,37	0,44	85,78
M4 0,27mm	1,63	62,04	215,94	0,47	94,21
MOH 0,23mm	1,77	62,89	218,90	0,64	140,14
M4 0,30mm	1,63	63,72	221,79	0,45	87,20

Sin embargo, estas mismas corrientes parásitas, producen en el acero un efecto desmagnetizante, que hace que el flujo magnético tienda a circular por la parte más exterior de las láminas, análogo al efecto pelicular de la corriente alterna por los conductores.

Este efecto desmagnetizante es más pronunciado mientras el centro de la sección transversal de la chapa esté más cerca de la superficie, es decir, que mientras más delgada sea la lámina, mayor será la desmagnetización que producen en ella las corrientes parásitas y por lo tanto, más energía magnetizante (reactiva) necesita el núcleo para orientar sus dominios magnéticos.

Lo contrario ocurre cuando aumenta el espesor de la lámina, que entonces sufre una desmagnetización menor y requiere menor energía reactiva y corriente de magnetización y vacío.

TABLA 9
Transformadores de 37,5 kVA

Tipo de acero	B (T)	Po (W)	Cpo (USD)	Io (A)	Qo (VAR)
MOH 0,23mm	1,68	103,62	360,66	0,75	147,18
M3 0,23mm	1,68	112,52	391,64	1,16	254,65
MOH 0,27mm	1,68	112,56	391,78	0,65	108,01
M3 0,27mm	1,68	130,43	453,98	1,10	230,36
MOH 0,23mm	1,79	131,82	458,82	1,54	345,29
M3 0,30mm	1,68	136,30	473,86	1,12	231,78
M4 0,27mm	1,68	137,55	478,6	1,22	258,48
M4-0,30mm	1,68	139,89	486,91	1,17	243,47

TABLA 10
Transformadores de 50kVA

Tipo de acero	B (T)	Po (W)	Cpo (USD)	Io (A)	Qo (VAR)
MOH 0,23mm	1,68	152,38	530,38	1,10	215,00
M3 0,23mm	1,68	165,47	575,94	1,70	373,20
MOH 0,27mm	1,68	165,53	576,15	0,96	160,26
M3 0,27mm	1,68	191,82	667,66	1,62	338,19
M3 0,30mm	1,68	200,19	696,79	1,65	341,67
M4 0,27mm	1,68	202,28	704,06	1,80	381,72
M4 0,30mm	1,68	205,71	716,00	1,72	357,89

CONCLUSIONES

1. No existe una relación directa entre la I_o y los costos de explotación de estos transformadores, sino a través de la influencia de esta en los valores de pérdidas de vacío (P_o).
2. Hay una relación directa entre la I_o y las pérdidas reactivas en los transformadores, pero su efecto en el Sistema Electroenergético Nacional no es cuantificable directamente en dinero.
3. El concepto que existe según el cual la calidad del acero incluye la magnitud de la corriente de vacío es erróneo, solo incluye las pérdidas activas de vacío.
4. Existen aceros de peores pérdidas activas de vacío y mejores corrientes de vacío y pérdidas reactivas de vacío.
5. El acero MOH-0,27 mm es mejor en todos los sentidos al M3-0,23 mm, ya que a partir de 1,65 t, tiene las mismas pérdidas activas y sin embargo, menores corrientes de excitación y pérdidas reactivas.
6. Existe la tendencia a consumir menos reactivo e I_o a medida que aumenta el espesor de la lámina.

REFERENCIAS

1. Pérez Clavillart, A. y otros: "Especificaciones técnicas para transformadores monofásicos de distribución", Unión Eléctrica, Cuba, 1997.
2. Pérez Clavillart, A. y otros: "Especificaciones técnicas para transformadores monofásicos de distribución", Primera Revisión. Unión Eléctrica. Cuba. 1998.
3. Corrales Martín, J.: *Cálculo óptimo de transformadores*, Universidad Politécnica de Barcelona, Barcelona, España, 1977.
4. Hernández Areu, O.: *Curso de pruebas a transformadores de potencia*, Monografía, CIPEL, Ciudad de La Habana, 2000.
5. *Documentación técnica de la Nipón Steel Corporation*, 1988.
6. Langsdorf, A.: *Theory of Alternating Current Machinery*, American Institute of Electrical Engineers, USA, 1978.

AUTORES

Orestes Hernández Areu
Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Investigador Titular, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba
e-mail:orestesh@electrica.cujae.edu.cu

Reinel Valido
Ingeniero Electricista, Especialista Energético, Aeropuerto Internacional José Martí, Ciudad de La Habana, Cuba
e-mail:valido@hav.ecasa.avianet.cu