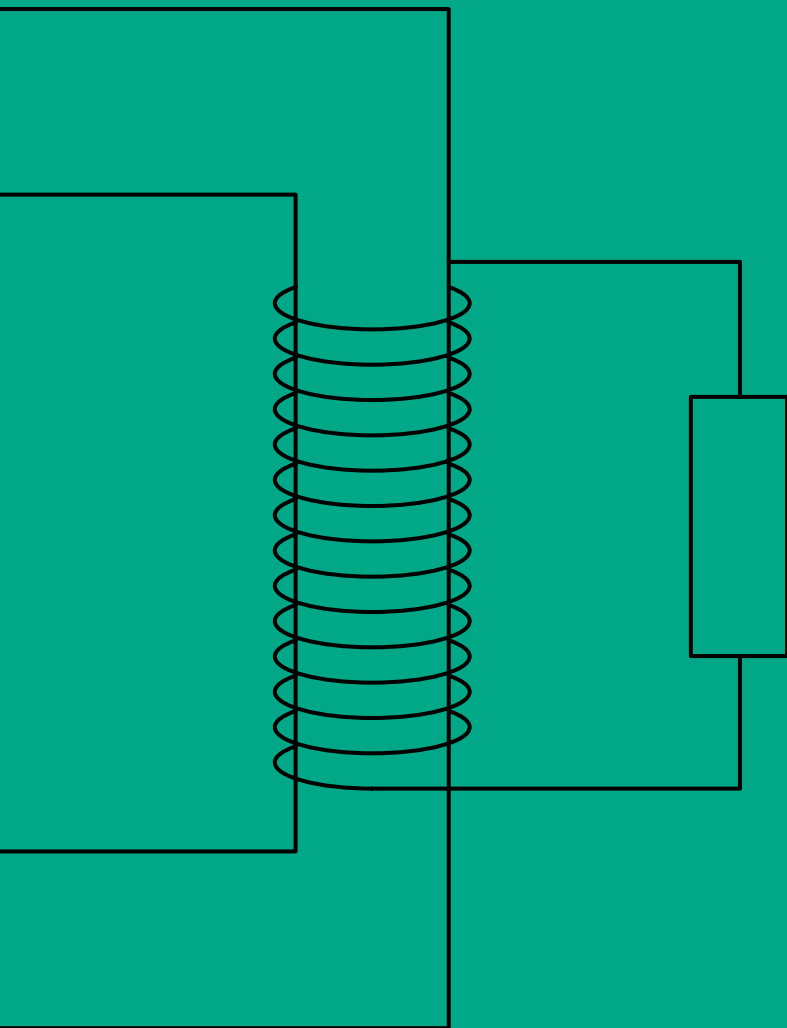
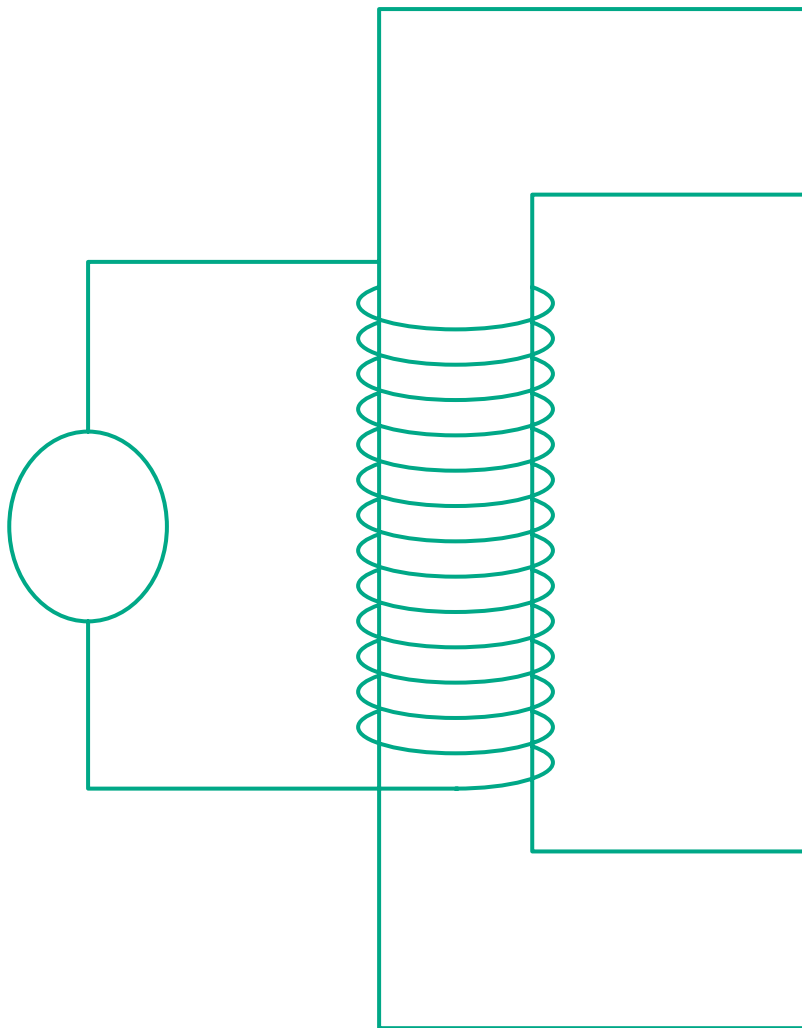


COL·LECCIÓ
BALANÇ ENERGÈTIC
D'EQUIPS CONSUMIDORS
MESURA I CÀLCUL

TRANSFORMADORS
ELÈCTRICS

14

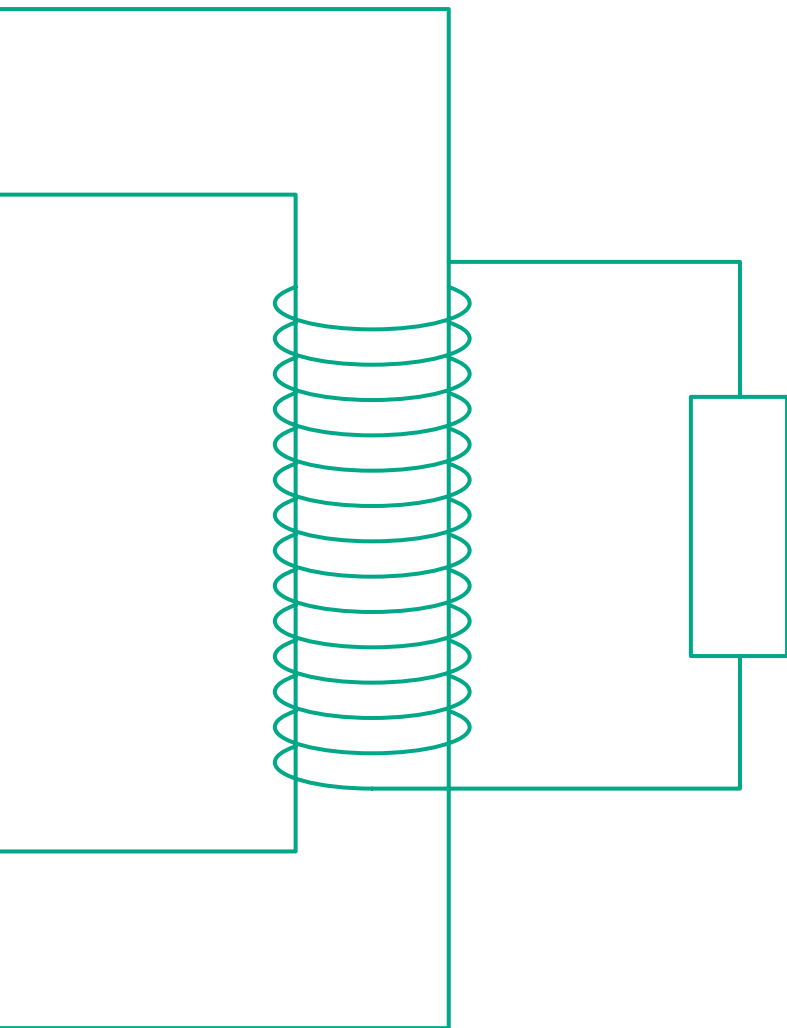




COL·LECCIÓ
BALANÇ ENERGÈTIC
D'EQUIPS CONSUMIDORS
MESURA I CÀLCUL

TRANSFORMADORS
ELÈCTRICS

14



Primera edició

Desembre de 2016

Autors

Aquesta col·lecció ha estat redactada per la Universitat Politècnica de Catalunya. Daniel Garcia-Almiñana i Lluïsa F. Cabeza.

Coordinació del document

Mariona Coll - Institut Català d'Energia

Revisor del document

Josep M^a Granollers - Institut Català d'Energia

Disseny

Eva Sánchez - Institut Català d'Energia

Maquetació

OXIGEN Comunicació gràfica

Versió electrònica

icaen.gencat.cat/balancenergetic



Aquesta obra està subjecta a una llicència Reconeixement-No Comercial-SenseObres Derivades 3.0 de Creative Commons. Se'n permet la còpia, distribució i comunicació pública sempre que se'n citi la font (Institut Català d'Energia) i l'ús concret no inclogui finalitat comercial. S'ha d'informar sobre les condicions sota les que aquest treball pot ser distribuït o comunicat. Tampoc no se'n poden fer obres derivades.

Per veure'n una còpia, visiteu:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/deed.ca>

Índex

0	Pròleg	7
1	Introducció	9
1.1	Justificació del mòdul	9
1.2	Objectiu del mòdul	10
1.3	Abast del mòdul	10
1.4	Dades macroenergètiques	10
2	Descripció del sistema	10
2.1	Definició	10
2.2	Principis de funcionament i paràmetres	11
2.3	Tipologies d'equip	11
2.4	Normativa aplicable	13
2.5	Descripció gràfica	14
3	Definició del balanç energètic	15
3.1	Descripció del balanç energètic	15
3.2	Esquema del balanç energètic	15
4	Bases de càlcul	16
4.1	Formulació	16
5	Planificació de mesures	18
5.1	Dades de què es disposa	18
5.2	Dades a mesurar	18
5.3	Inventari d'aparells de mesura	19
5.4	Seguretat en persones i equips	19
6	Realització de les mesures	20
6.1	Mesura de les temperatures de superfície	20
7	Exemple pràctic	22
7.1	Enunciat	22
7.2	Dades	22
7.3	Càlculs i resultat	23
7.4	Comentaris	23
8	Referències	24

0. Pròleg

La Generalitat de Catalunya va aprovar el 9 d'octubre de 2012 el Pla de l'energia i canvi climàtic de Catalunya 2012-2020 (Pecac 2020), que serveix com a guia per a les polítiques energètiques i de mitigació del canvi climàtic a Catalunya. Un dels eixos principals del pla és promoure i desenvolupar projectes d'estalvi energètic i energies renovables. Les polítiques d'estalvi i eficiència energètica es configuren com un instrument de progrés de la societat, perquè contribueixen al benestar de la població, representen un element de responsabilitat social, projecten les activitats humanes cap al desenvolupament sostenible i estableixen un marc per al desenvolupament de la competitivitat empresarial.

Les auditories energètiques són una peça clau per identificar les oportunitats i potenciar les inversions en projectes d'estalvi energètic i energies renovables. Una auditoria energètica de qualitat aporta la informació necessària a un centre consumidor d'energia, ja sigui un edifici, una indústria o una flota de transport, per tal d'establir un full de ruta amb una estratègia de millora contínua del seu consum energètic.

En aquest sentit, el novembre de 2012 l'Institut Català d'Energia (ICAEN) va publicar la *Guia metodològica per a realitzar auditories energètiques*, on es ressalta el seu paper clau, sempre que es facin de manera meticulosa. El factor de més pes per determinar la qualitat de l'auditoria és l'obtenció del nombre superior possible de dades mesurades al camp de treball.

Arran d'aquella guia, i de la resposta que va tenir entre els professionals, l'Icaen va detectar que calia complementar la guia amb la formació necessària per fer mesures de camp amb instruments portàtils, i posteriorment conèixer el balanç energètic dels sistemes en estudi. També calia dotar els destinataris d'un cert criteri en la interpretació dels valors obtinguts en les mesures amb els instruments portàtils.

D'aquí neix aquesta publicació, pensada com una col·lecció de mòduls amb una estructura similar. En primer lloc, es justifica l'elecció d'aquell equip i la seva importància en l'àmbit macroeconòmic. Després es descriu i delimita el sistema objecte del balanç energètic i la normativa que se li aplica. A partir d'aquí, es defineix el balanç energètic i tots els càlculs necessaris, fórmula a fórmula, amb les taules i diagrames de bibliografia que calguin. Finalment, es detalla la planificació de les mesures, les característiques dels instruments mesuradors i les mesures mateixes, pas a pas. Per últim, s'inclou l'aplicació de la metodologia del mòdul a un cas concret o dos, i es comenta la fiabilitat dels resultats obtinguts.

Val a dir que aquest càlcul és necessari en l'avaluació o diagnòstic que es porta a terme en una auditoria, però també pot formar part del protocol de manteniment d'una instal·lació, i per tant aquestes mesures de camp poden caldre amb certa periodicitat. És per això que aquesta col·lecció s'adreça tant als professionals del sector de la consultoria energètica com als responsables energètics dels centres consumidors d'energia.

El mòdul que ara esteu consultant és el catorzè d'aquesta col·lecció que pren com a sistema els transformadors elèctrics. El balanç energètic caracteritza els fluxos d'entrada i sortida del transformador per obtenir en un càlcul posterior, la relació entre la potència elèctrica de sortida i la potència elèctrica d'entrada al transformador.

1. Introducció

1.1. Justificació del mòdul

Des de la producció massiva de l'electricitat com a font d'energia a finals del segle XIX fins avui en dia, són moltes les aplicacions desenvolupades on l'electricitat n'és la font d'energia principal. La generació d'electricitat es produeix en llocs diferents al seu consum i, donada la dificultat que resulta emmagatzemar-la, és necessari el transport directe d'aquesta a través de xarxes que connecten els punts de generació i consum, salvant grans distàncies.

En el transport de l'energia elèctrica es produeixen una sèrie de pèrdues energètiques en el cablejat de la xarxa que impliquen un consum d'energia més elevat per satisfer les necessitats elèctriques dels punts de consum. És per això que el transport es realitza a alta i mitjana tensió amb la finalitat de reduir la secció dels cables, ja que s'utilitzen molts metres de cablejat i, a més a més, s'assoleixen intensitats de corrent més baixes i, per tant, menys pèrdues energètiques.

El transport de l'electricitat a elevades tensions provoca la necessitat de transformar-la perquè es pugui utilitzar en punts de consum on la tensió requerida és molt més baixa i en altres casos (centres de producció) es duu a terme el procediment invers. Els dispositius que possibiliten l'anterior situació són els transformadors elèctrics.

De la mateixa manera que el cablejat de la xarxa elèctrica, els transformadors presenten una sèrie de pèrdues energètiques que es manifesten en forma de calor, disminueixen l'eficiència d'aquests i provoquen la instal·lació de sistemes de refrigeració per evitar problemes majors.

Per tant, els transformadors han de ser dispositius molt eficients, ja que grans pèrdues energètiques en el transformador poden significar un subministrament deficient d'energia elèctrica en els punts de consum.

És per això que és convenient fer un balanç energètic en transformadors elèctrics per comprovar el funcionament d'aquests i, posteriorment, optimitzar-lo o, en el pitjor dels casos, canviar els transformadors per uns altres de nova generació molt més eficients com se sol fer amb els transformadors de més de 15 anys. Totes aquestes mesures impliquen una reducció dels costos econòmics i mediambientals.

1.2. Objectiu del mòdul

L'objectiu d'aquest mòdul és proporcionar una metodologia per poder fer una sèrie de mesures en transformadors elèctrics i unes bases de càlcul per caracteritzar-ne el balanç energètic i en un càlcul posterior trobar el rendiment.

1.3. Abast del mòdul

Aquest mòdul se centra bàsicament en tots els tipus de transformadors de baixa tensió. En l'apartat 2.3 es mostra de manera genèrica una classificació d'acord amb aspectes com el tipus constructiu, el tipus de subministrament elèctric i els tipus de connexió que pot tenir un transformador.

1.4. Dades macroenergètiques

Les dades que es mostren a continuació han estat extretes del balanç d'energia elèctrica de Catalunya de l'any 2012 [1].

L'any 2012 a Catalunya la demanda d'energia elèctrica en barres de central va assolir els 45.719,8 GWh, dels quals 3.337,5 GWh van ser pèrdues energètiques en el transport i distribució de l'energia elèctrica, és a dir, aproximadament un 7,3%. Dins d'aquest percentatge també s'inclouen les pèrdues generades en la transformació de l'energia elèctrica.

2. Descripció del sistema

2.1. Definició

Un transformador elèctric és una màquina elèctrica estàtica destinada a transferir la potència elèctrica d'un circuit a un altre de diferent tensió. L'objectiu principal d'un transformador elèctric és modificar el valor de la seva tensió d'entrada, adaptant-la al valor adequat i necessari pels diferents usos a la sortida d'aquest (transport, ús domèstic, distribució, etc.).

Un transformador està format per una base de material ferromagnètic anomenada nucli en la qual s'ubiquen dos bobinats monofàsics o trifàsics segons el tipus de circuits elèctrics que tingui connectats. El bobinat que rep l'energia elèctrica de la font s'anomena circuit primari, i el circuit on es transfereix l'energia elèctrica a diferent voltatge s'anomena circuit secundari. A més a més, els transformadors incorporen sistemes de refrigeració, que poden ser secs (refrigeració natural amb ventiladors) o d'oli (refrigeració amb oli dielèctric).

Cal dir que els transformadors són dispositius molt freqüents a totes les instal·lacions i dispositius elèctrics, ja que el fet de poder modificar la tensió i altres paràmetres elèctrics dóna solució a molts problemes elèctrics.

2.2. Principis de funcionament i paràmetres

El funcionament d'un transformador elèctric es basa en el principi de la inducció electro-magnètica i es pot explicar a partir del comportament elèctric d'un transformador monofàsic ideal.

En primer lloc, la bobina del circuit primari d'un transformador monofàsic rep un corrent elèctric amb una certa tensió d'entrada des de la font d'energia elèctrica. Aquest corrent circula per la bobina del primari i al mateix temps indueix un flux magnètic en el nucli del transformador. Gràcies a aquest flux magnètic generat en el nucli s'indueix una força electromotriu en la bobina del circuit secundari, on el valor de la tensió d'aquest depèn de la relació de transformació, és a dir, la relació entre el nombre d'espores del bobinat del circuit primari i el del bobinat del circuit secundari.

Segons aquesta relació, es destaquen dos tipus de transformadors: els elevadors i els reductors. Els elevadors augmenten el valor de la tensió de sortida respecte al valor de la d'entrada, mentre que els reductors la disminueixen.

Un cop es coneixen els principis de funcionament dels transformadors elèctrics, ja es pot determinar l'eficiència d'aquests, és a dir, la relació entre la potència elèctrica de sortida i la potència elèctrica d'entrada al transformador. Per tant, els paràmetres necessaris per calcular-la són: la potència activa i/o aparent d'entrada al circuit primari i la potència activa i/o aparent de sortida al circuit secundari.

Cal dir que en el cas que els anteriors paràmetres no es puguin mesurar directament, es necessitarà la tensió, la intensitat i el factor de potència d'ambdós circuits.

2.3. Tipologies d'equip

A continuació, es mostra una classificació genèrica dels transformadors elèctrics atenent als diversos aspectes esmentats a l'apartat 1.3. Segons el tipus constructiu del transformador es té:

Transformador tipus nucli. Aquest tipus de transformador consta d'una peça rectangular d'acer, amb làmines fines aïllades elèctricament, amb els bobinats (primari i secundari) enrotllats sobre els dos costats del rectangle.

Transformador tipus cuirassat. Aquest tipus de transformador consta d'un nucli laminat de tres columnes on els bobinats estan enrotllats a la columna central. En aquest tipus de transformador, el nucli es construeix amb làmines fines aïllades elèctricament entre elles per minimitzar els corrents paràsits.

Segons el tipus de subministrament elèctric, els transformadors poden ser monofàsics o trifàsics. Actualment, els més utilitzats són els trifàsics, que poden estar construïts mitjançant tres transformadors monofàsics o formant una unitat compacta que resulta més econòmica (transformador de tres columnes).

Segons els tipus de connexió elèctrica dels circuits primari i secundari d'un transformador trifàsic, es tenen els transformadors amb connexió triangle- triangle ($\Delta\Delta$), triangle-estrella (ΔY), estrella-triangle ($Y\Delta$), estrella-estrella (YY), triangle-zigzag (ΔZ) i estrella-zigzag (YZ). Aquestos dos últims, utilitzats per a casos especials.

Segons el tipus de connexió dels circuits d'un transformador trifàsic, el càlcul de la relació de transformació esmentada en l'apartat 2.2 pot variar. A continuació, en l'Equació 14.1 es mostra la relació d'espores genèrica, i des de l'Equació 14.2 a l'Equació 14.5 es mostren les diferents relacions de transformació particularitzades als tipus de connexió dels circuits primari i secundari.

$$a = \frac{V_{\phi P}}{V_{\phi S}} = \frac{N_P}{N_S} \quad \text{Equació 14.1}$$

On:

a [-] correspon a la relació d'espores del transformador.

$V_{\phi P}$ [V] correspon a la tensió de fase del circuit primari del transformador.

$V_{\phi S}$ [V] correspon a la tensió de fase del circuit secundari del transformador.

N_P [-] correspon al nombre d'espores del bobinat del circuit primari del transformador.

N_S [-] correspon al nombre d'espores del bobinat del circuit secundari del transformador.

- Connexió triangle-triangle ($\Delta\Delta$):

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\phi P}}{V_{\phi S}} = a \quad \text{Equació 14.2}$$

- Connexió triangle-estrella (ΔY):

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\phi P}}{\sqrt{3} \cdot V_{\phi S}} = a/\sqrt{3} \quad \text{Equació 14.3}$$

- Connexió estrella-estrella (YY):

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3} \cdot V_{\phi P}}{\sqrt{3} \cdot V_{\phi S}} = a \quad \text{Equació 14.4}$$

- Connexió estrella-triangle (YΔ):

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3} \cdot V_{\phi P}}{V_{\phi S}} = \sqrt{3} \cdot a \quad \text{Equació 14.5}$$

On:

V_{LP} [V] correspon a la tensió de línia del circuit primari del transformador.

V_{LS} [V] correspon a la tensió de línia del circuit secundari del transformador.

$V_{\phi P}$ [V] correspon a la tensió de fase del circuit primari del transformador.

$V_{\phi S}$ [V] correspon a la tensió de fase del circuit secundari del transformador.

Finalment, cal dir que els transformadors construïts amb materials aïllants, com el piralè, actualment estan del tot prohibits donat el risc elevat de toxicitat que presenten els fums producte de l'encesa d'aquest material. És per això que hi ha programes que incentiven la desaparició dels transformadors construïts amb aquest material.

2.4. Normativa aplicable

La normativa aplicable en aquest mòdul és bàsicament el Reglament Electrotècnic per a Baixa Tensió (RBT), RD 842/2002 [2] i, més concretament, la instrucció tècnica complementària *ITC-BT-48 Instalación de receptores. Transformadores y autotransformadores. Reactancias y rectificadores. Condensadores*. En la present instrucció s'exposen les condicions generals d'instal·lació de transformadors i la protecció que han de tenir aquests contra sobreintensitats.

També es pot consultar la norma UNE-EN 60076-1 Transformadores de potencia. Generalidades. Cal tenir en compte que hi ha un ampli espectre de normes referents a aplicacions especials de transformadors, per exemple: transformadors submergits, transformadors dins d'equips i maquinàries, transformadors per a aplicacions crítiques, etc.

Referent a l'afectació sobre el disseny ecològic de la Directiva 2009/125/CE, s'aplica el Reglament 548/2014 [3]. Aquest reglament aplica a transformadors de potència mínima d'1 kVA utilitzats en xarxes de transmissió i distribució elèctrica de 50 Hz o per a aplicacions industrials

2.5. Descripció gràfica

Des de la Figura 14.1 fins a la Figura 14.5 es mostra la descripció gràfica del principi de funcionament d'un transformador monofàsic i també es mostren diferents imatges d'aquests.

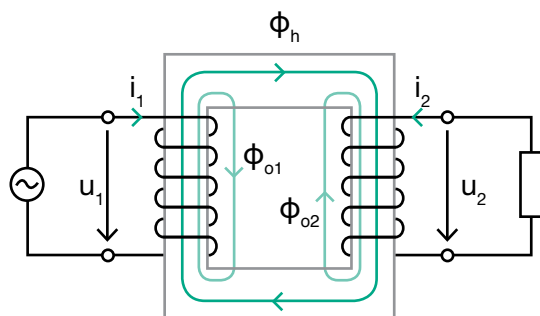


Figura 14.1. Esquema del principi de funcionament d'un transformador monofàsic.

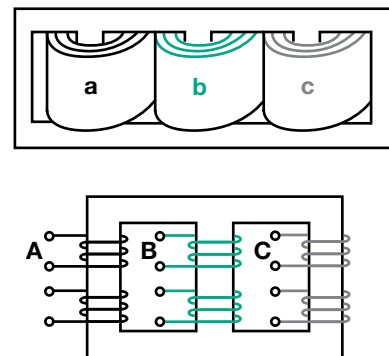


Figura 14.2. Esquema d'un transformador trifàsic.



Figura 14.3. Transformador monofàsic.

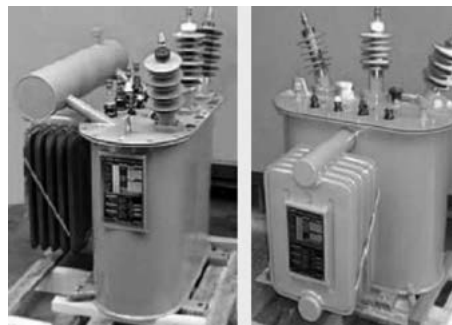


Figura 14.4. Transformador trifàsic d'alta eficiència.



Figura 14.5. Transformador trifàsic operant en una subestació transformadora d'energia elèctrica

3. Definició del balanç energètic

3.1. Descripció del balanç energètic

Per tal de calcular l'eficiència energètica dels transformadors elèctrics s'ha de caracteritzar el balanç energètic d'aquests. Per tant, en el balanç energètic d'un transformador es considerarà com a única entrada la potència elèctrica subministrada al circuit primari i, com a sortides, la potència elèctrica que proporciona el circuit secundari, la potència associada a les pèrdues elèctriques per efecte Joule, la potència associada a les pèrdues magnètiques en els bobinats i en el nucli, la potència associada a les pèrdues que presenten les unions i connexions (punts calents) i altres pèrdues addicionals que es poden presentar com poden ser la inducció de fluxos magnètics a altres parts ferromagnètiques del transformador, o pèrdues de potència producte de la presència de corrents paràsits en el transformador.

Un cop es tenen caracteritzats els fluxos energètics d'entrada i sortida d'un transformador elèctric, relacionant la potència elèctrica de sortida al secundari i la potència elèctrica subministrada al primari, s'obté l'eficiència energètica d'aquest.

Cal dir que una altra manera de calcular l'eficiència és caracteritzant el percentatge de pèrdues energètiques respecte a l'energia total d'entrada i restar-lo de l'eficiència ideal, és a dir, del 100%. Aquest últim mètode és més propi dels bancs d'assaig en laboratoris i, per tant, s'aconsella utilitzar el primer mètode referenciat.

3.2. Esquema del balanç energètic

A l'Equació 14.6, es mostra la relació entre els fluxos d'entrada i els fluxos de sortida en un transformador elèctric, i a la Figura 14.6 es mostra l'esquema de les parts d'un transformador, així com també l'esquema del balanç energètic del mateix.

$$P_{e,p} = P_{e,s} + \dot{Q}_p + P_{mag} + P_{unions} + P_{addicionals} \quad \text{Equació 14.6}$$

On:

$P_{e,p}$ [kW] correspon a la potència elèctrica subministrada al circuit primari.

$P_{e,s}$ [kW] correspon a la potència elèctrica que proporciona el circuit secundari.

\dot{Q}_p [kW] correspon a la potència de pèrdues elèctriques i per transferència de calor en el transformador, altrament anomenades pèrdues en el coure.

P_{mag} [kW] correspon a les pèrdues magnètiques al bobinat i nucli del transformador, altrament anomenades pèrdues en el ferro.

P_{unions} [kW] correspon a les pèrdues als punts calents del transformador (unions i connexions).

$P_{addicionals}$ [kW] correspon a les pèrdues addicionals que es puguin presentar al transformador.

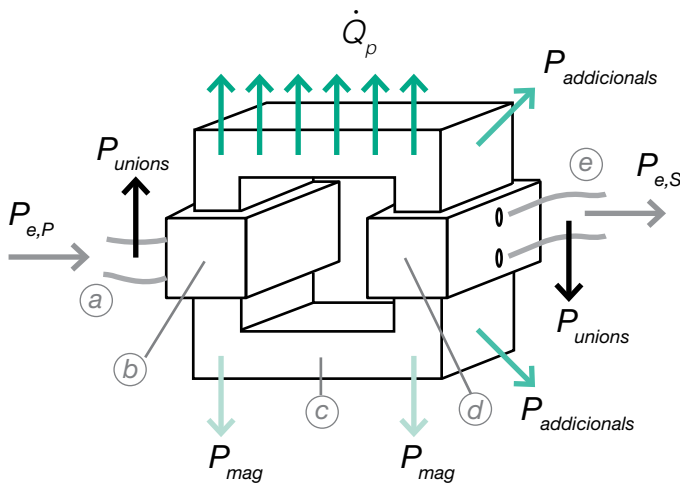


Figura 14.6. Esquema de les parts d'un transformador elèctric i balanç energètic.

- a) Connexió de circuit primari
- b) Bobinat primari
- c) Nucli ferromagnètic
- d) Bobinat secundari
- e) Connexió circuit secundari

4. Bases de càlcul

4.1. Formulació

En el cas que no es puguin mesurar directament les potències elèctriques del circuit primari i secundari s'hauran de calcular. Cal tenir present que, a efectes de simplificació del càlcul, es considera que les càrregues del transformador es troben equilibrades, és a dir, que les impedàncies de línia de cadascuna de les fases són iguals. Sota aquesta hipòtesi simplificada, el càlcul de la potència elèctrica subministrada al circuit primari es farà per a transformadors monofàsics mitjançant l'Equació 14.7 i per a transformadors trifàsics mitjançant l'Equació 14.8.

$$P_{e,P} = V_p \cdot I_p \cdot \cos\phi_p \quad \text{Equació 14.7}$$

$$P_{3e,P} = \sqrt{3} \cdot V_{LP} \cdot I_{LP} \cdot \cos\phi_{3P} \quad \text{Equació 14.8}$$

On:

$P_{e,P}$ [W] correspon a la potència elèctrica subministrada al circuit primari del transformador monofàsic.

V_p [V] correspon al voltatge del circuit primari del transformador monofàsic.

I_p [A] correspon a la intensitat del circuit primari del transformador monofàsic.

$\cos\phi_p$ [-] correspon al factor de potència del circuit primari del transformador monofàsic.

$P_{3e,P}$ [W] correspon a la potència elèctrica subministrada al circuit primari del transformador trifàsic.

V_{LP} [V] correspon al voltatge de línia del circuit primari del transformador trifàsic.

I_{LP} [A] correspon a la intensitat de línia del circuit primari del transformador trifàsic.

$\cos\phi_{3P}$ [-] correspon al factor de potència del circuit primari del transformador trifàsic.

El càlcul de la potència elèctrica proporcionada pel circuit secundari es realitzarà per transformadors monofàsics mitjançant l'Equació 14.9 i per a transformadors trifàsics mitjançant l'Equació 14.10.

$$P_{e,S} = V_S \cdot I_S \cdot \cos\phi_S \quad \text{Equació 14.9}$$

$$P_{3e,S} = \sqrt{3} \cdot V_{LS} \cdot I_{LS} \cdot \cos\phi_{3S} \quad \text{Equació 14.10}$$

On:

$P_{e,S}$ [W] correspon a la potència elèctrica subministrada al circuit secundari del transformador monofàsic.

V_S [V] correspon al voltatge del circuit secundari del transformador monofàsic.

I_S [A] correspon a la intensitat del circuit secundari del transformador monofàsic.

$\cos\phi_p$ [-] correspon al factor de potència del circuit secundari del transformador monofàsic.

$P_{3e,S}$ [W] correspon a la potència elèctrica subministrada al circuit secundari del transformador trifàsic.

V_{LS} [V] correspon al voltatge de línia del circuit secundari del transformador trifàsic.

I_{LS} [A] correspon a la intensitat de línia del circuit secundari del transformador trifàsic.

$\cos\phi_{3S}$ [-] correspon al factor de potència del circuit secundari del transformador trifàsic.

Finalment un cop es tenen calculades o mesurades les potències del circuit primari i secundari ja es pot calcular l'eficiència energètica del transformador. Per a transformadors monofàsics, es calcula mitjançant l'Equació 14.11 i per a transformadors trifàsics, mitjançant l'Equació 14.12.

$$\eta_T = \frac{P_{e,S}}{P_{e,P}} \cdot 100 \quad \text{Equació 14.11}$$

$$\eta_{3T} = \frac{P_{3e,S}}{P_{3e,P}} \cdot 100 \quad \text{Equació 14.12}$$

On:

η_T [-] correspon a l'eficiència energètica o rendiment d'un transformador monofàsic.

η_{3T} [-] correspon a l'eficiència energètica o rendiment d'un transformador trifàsic.

5 Planificació de mesures

5.1 Dades de què es disposa

- Dades que proporciona el fabricant a partir de la placa de característiques del transformador: tipus de connexions i paràmetres nominals de funcionament.
- Dades referents a la càrrega del transformador.

5.2 Dades a mesurar

Per a transformadors monofàsics:

- Potència elèctrica subministrada al circuit primari: $P_{e,P}$ [W]
- Voltatge del circuit primari: V_P [V]
- Intensitat del circuit primari: I_P [A]
- Factor de potència del circuit primari: $\cos\varphi_P$ [-]
- Potència elèctrica del circuit secundari: $P_{e,S}$ [W]
- Voltatge del circuit secundari: V_S [V]
- Intensitat del circuit secundari: I_S [A]
- Factor de potència del circuit secundari: $\cos\varphi_S$ [-]

Per a transformadors trifàsics:

- Potència elèctrica subministrada al circuit primari: $P_{3e,P}$ [W]
- Voltatge de línia del circuit primari: V_{LP} [V]
- Intensitat de línia del circuit primari: I_{LP} [A]
- Factor de potència del circuit primari: $\cos\varphi_{3P}$ [-]
- Potència elèctrica del circuit secundari: $P_{3e,S}$ [W]
- Voltatge de línia del circuit secundari: V_{LS} [V]
- Intensitat de línia del circuit secundari: I_{LS} [A]
- Factor de potència del circuit secundari: $\cos\varphi_{3S}$ [-]

5.3. Inventari d'aparells de mesura

- Analitzador de xarxes elèctriques (Figura 14.7):
 - Variable mesurada: $V_P, I_P, \cos\varphi_P, P_{e,P}, V_S, I_S, \cos\varphi_S, P_{eS}$.

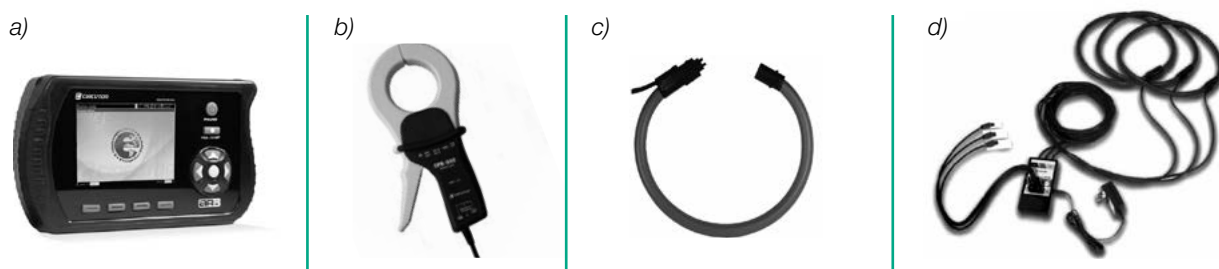


Figura 14.7. Analitzador elèctric AR6 + accessoris. a) Analitzador de xarxes, b) Pinça amperimètrica rígida CPR-500, c) Pinça amperimètrica flexible C-flex, d) Muntatge de les pinces C-Flex.

5.4 Seguretat en persones i equips

Abans de realitzar qualsevol mesura, és necessari i imprescindible llegir les instruccions d'ús de l'aparell o dispositiu de mesura.

Seguretat per a les persones. En la mesura de les variables $V_P, I_P, \cos\varphi_P, P_{e,P}, V_S, I_S, \cos\varphi_S, P_{eS}, V_{LP}, I_{LP}, \cos\varphi_{3P}, P_{3e,P}, V_{LS}, I_{LS}, \cos\varphi_S, P_{e,S}$ i altres paràmetres elèctrics, s'ha de tenir en compte que es fa sobre els borns de connexió del transformador i, com a tal, la mesura ha de ser realitzada per un tècnic qualificat que no treballi mai sol, que disposi d'elements de protecció com guants i calçat aïllant, que utilitzi eines normalitzades, que hagi fet un curs de seguretat industrial per tal de tenir recursos preventius, i que es conegui en la mesura del possible el Pla específic de riscos laborals de l'empresa.

Seguretat en equips. És aconsellable no tractar de manera brusca l'analitzador de xarxes i els accessoris. L'analitzador és un aparell senzill de mantenir. Periòdicament, s'ha de netejar la capsa amb un drap humitejat, de manera suau, amb aigua i detergent, mai productes abrasius i dissolvents. Cal evitar tot ajustament, manteniment o reparació que impliqui l'obertura de l'equip; només es pot obrir l'equip per personal qualificat.

Abans de qualsevol operació, modificació de les connexions, canvi, manteniment o reparació, cal desconnectar l'aparell de tota font d'alimentació. Quan se sospiti d'un funcionament erroni o fallada de l'equip o de la protecció, aquest ha de deixar-se fora de servei i assegurar-se que no es pugui produir cap connexió accidental.

NOTA IMPORTANT EN TERMES DE SEGURETAT

És important aclarir que el mètode de càlcul i de mesura de les variables mostrat només és vàlid per a transformadors de baixa tensió (<1000 V), ja que els transformadors d'alta i mitjana tensió són molt perillosos i una persona no s'hi pot apropar. En aquests casos, se solen trobar els elements de mesura integrats al transformador i es poden consultar els valors mesurats directament als panells de control instal·lats.

6. Realització de les mesures

6.1. Mesura dels paràmetres elèctrics del transformador

1. S'han de connectar les preses de tensió i les pinces amperimètriques segons el tipus d'instal·lació, tal com s'indica a la Figura 14.8 i 14.9, al bobinat primari o secundari del transformador. Cal tenir en compte les normes de seguretat del manual i les referències en l'apartat 5.4.
2. S'ha d'engegar l'aparell i seleccionar el tipus de mesura a realitzar prement la icona [ANÁLISIS DE MEDIDAS]. Un cop s'obri la llista amb les diferents mesures disponibles, s'ha de seleccionar mitjançant el cursor gris el tipus de mesura que s'ha de fer segons les configuracions presentades en la Figura 14.8.
3. Un cop seleccionada la mesura a realitzar, s'ha de prémer la tecla dinàmica [ACCIONES] i seleccionar [REGISTROS]. S'obrirà una pantalla on es podran visualitzar els paràmetres principals de la connexió que s'ha d'analitzar.
4. S'han de llegir les mesures, guardar-les o anotar-les. És convenient deixar l'analitzador connectat durant el temps en què es fan les altres mesures perquè integri tot el període.

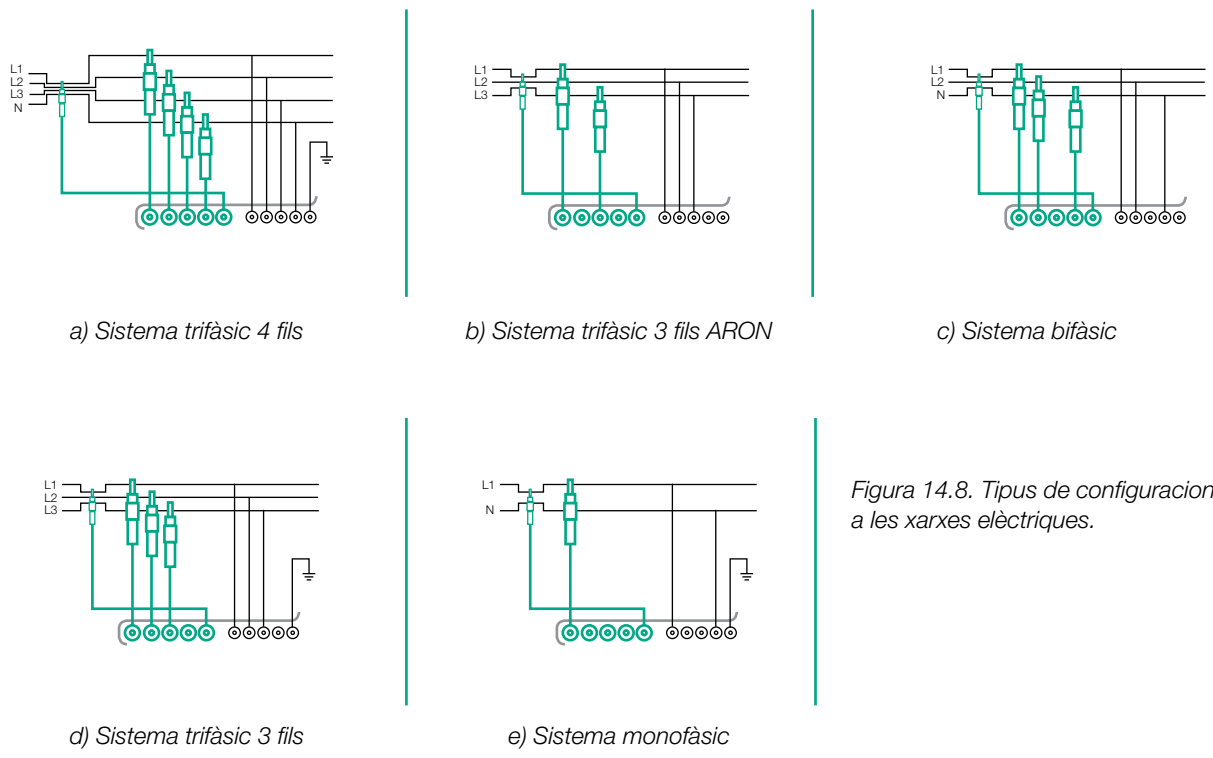


Figura 14.8. Tipus de configuracions a les xarxes elèctriques.

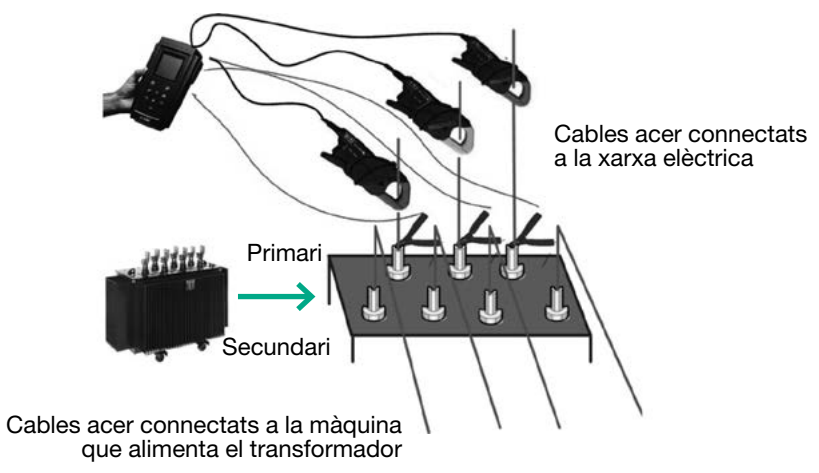


Figura 14.9. Esquema de la connexió de les pinces amperimètriques de l'analitzador en un transformador trifàsic.

7. Exemple pràctic

7.1. Enunciat

Una línia trifàsica té una tensió entre fases de 690 V i alimenta, a través d'un transformador ΔY , un motor d'inducció trifàsic amb les característiques mostrades a la Taula 14.1.

Paràmetres	Unitats	Dada
Tipus	-	Inducció trifàsic
Connexió	-	Triangle
Nombre de pols	-	4
Potència nominal	kW	45
Velocitat angular nominal	r.p.m.	1475
Tensió nominal	V	400
Factor de potència nominal	-	0,88
Eficiència nominal	%	93,4

Taula 14.1. Dades de què es disposa sobre el motor alimentat pel transformador.

Tenint en compte les dades esmentades anteriorment, es demana calcular l'eficiència energètica del transformador segons el nivell de càrrega del motor i comprovar si s'allunya molt de l'eficiència nominal proporcionada pel fabricant.

7.2. Dades

A la Taula 14.2, es mostra el recull de dades de què es disposa sobre el transformador, i a la Taula 14.3 es mostren les dades mesurades en aquest.

Paràmetres	Unitats	Dada
Tipus de transformador	-	Trifàsic
Connexió	-	Triangle-estrella
Potència aparent nominal	kVA	53
Transformació del voltatge	V	690/400
Eficiència nominal	%	98

Taula 14.2. Dades principals de què es disposa del transformador elèctric.

Paràmetres	Unitats	Dada
Potència elèctrica del circuit primari	kW	30,167
Potència elèctrica del circuit secundari	kW	29,243

Taula 14.3. Dades mesurades en els circuits del transformador.

7.3 Càlculs i resultat

A partir de les dades referenciades a la Taula 14.1, Taula 14.2 i Taula 14.3, es pot calcular el nivell de càrrega en el secundari del transformador i, posteriorment, l'eficiència d'aquest.

En primer lloc, es procedeix a avaluar la càrrega en el secundari del transformador, en aquest cas, la potència elèctrica que absorbeix el motor en aquesta situació: 29,243 kW. Per altra banda, 30,167 kW és la potència elèctrica del circuit primari del transformador quan el seu secundari alimenta el motor que absorbeix una potència de 29,243 kW.

Amb aquests valors, es pot calcular l'eficiència del transformador:

$$\eta_{3T} = \frac{P_{3e, S}}{P_{3e, P}} \cdot 100$$

$$\eta_{3T} = \frac{29,243 \text{ kW}}{30,167 \text{ kW}} \cdot 100 = 96,94\% \approx 97\%$$

7.4. Comentaris

En aquesta situació, el rendiment del transformador està per sota del valor que apareix a la placa de característiques d'aquesta màquina, ja que el de la placa és a condicions nominals, i per a una càrrega inferior presenta un rendiment pitjor. No obstant això, el valor és bastant proper al nominal i és elevat dins del que podríem considerar correcte.

8. Referències

[1] Dades de l'energia ICAEN. *Balanç d'energia elèctrica de Catalunya. Any 2012*. Generalitat de Catalunya.

http://icaen.gencat.cat/ca/energia/estadistiques/resultats/anuals/balanc_energia/

[2] Real Decreto 842/2002. *Reglament electrotècnic per a baixa tensió*. BOE, 18 de setembre de 2002.

http://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2002-18099

[3] Directiva 2009/125/CE. Reglament 548/2014 de 21 de maig de 2014.

<https://www.google.es/webhp?sourceid=chrome-instant&ion=1&espv=2&ie=UTF-8#q=Directiva+2009%2F125%2FCE.+Reglament+548%2F2014+de+21+de+maig+de+2014>

