

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Industrial electroheating equipment – Test methods for direct arc furnaces

Chauffage électrique industriel – Méthodes d'essai des fours à arc direct





THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2011 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester.

If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de la CEI ou du Comité national de la CEI du pays du demandeur.

Si vous avez des questions sur le copyright de la CEI ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de la CEI de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland
Email: inmail@iec.ch
Web: www.iec.ch

About the IEC

The International Electrotechnical Commission (IEC) is the leading global organization that prepares and publishes International Standards for all electrical, electronic and related technologies.

About IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC. Please make sure that you have the latest edition, a corrigenda or an amendment might have been published.

- Catalogue of IEC publications: www.iec.ch/searchpub

The IEC on-line Catalogue enables you to search by a variety of criteria (reference number, text, technical committee,...). It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.

- IEC Just Published: www.iec.ch/online_news/justpub

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details twice a month all new publications released. Available on-line and also by email.

- Electropedia: www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 20 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary online.

- Customer Service Centre: www.iec.ch/webstore/custserv

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please visit the Customer Service Centre FAQ or contact us:

Email: csc@iec.ch

Tel.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00

A propos de la CEI

La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

A propos des publications CEI

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu. Veuillez vous assurer que vous possédez l'édition la plus récente, un corrigendum ou amendement peut avoir été publié.

- Catalogue des publications de la CEI: www.iec.ch/searchpub/cur_fut-f.htm

Le Catalogue en-ligne de la CEI vous permet d'effectuer des recherches en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Il donne aussi des informations sur les projets et les publications retirées ou remplacées.

- Just Published CEI: www.iec.ch/online_news/justpub

Restez informé sur les nouvelles publications de la CEI. Just Published détaille deux fois par mois les nouvelles publications parues. Disponible en-ligne et aussi par email.

- Electropedia: www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne au monde de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 20 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans les langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International en ligne.

- Service Clients: www.iec.ch/webstore/custserv/custserv_entry-f.htm

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions, visitez le FAQ du Service clients ou contactez-nous:

Email: csc@iec.ch

Tél.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00



IEC 60676

Edition 3.0 2011-11

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Industrial electroheating equipment – Test methods for direct arc furnaces

Chauffage électrique industriel – Méthodes d'essai des fours à arc direct

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

R

ICS 25.180.10

ISBN 978-2-88912-725-2

CONTENTS

FOREWORD.....	3
1 Scope and object.....	5
2 Normative references	5
3 Terms and definitions	5
4 Features of the EAF system	9
4.1 General.....	9
4.2 Electrical assembly of EAF	9
4.3 Furnace construction.....	9
4.4 Water cooling	10
5 Type of tests and general conditions of their performance	10
5.1 General.....	10
5.2 List of tests during cold and hot state	10
6 Technical tests	11
6.1 Electrical insulation of high-current system.....	11
6.1.1 General	11
6.1.2 Insulation resistance.....	11
6.2 Cooling water system	11
6.3 Electrode motion speed.....	12
6.4 Short-circuit test procedures.....	12
6.4.1 General	12
6.4.2 High current system: resistance and reactance of EAFac	12
6.4.3 Test procedures	12
6.4.4 Asymmetry factor.....	16
6.5 Main characteristics of EAF during production	16
6.5.1 General	16
6.5.2 Test procedures	16
6.6 Electrode consumption	17
6.7 Phase rotation.....	18
6.8 EAF – Rated capacity.....	18
Bibliography.....	19
Figure 1 – Wiring diagram for measuring electrical data of the high current system to determine the resistance and reactance values.....	13

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**INDUSTRIAL ELECTROHEATING EQUIPMENT –
TEST METHODS FOR DIRECT ARC FURNACES**

FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as “IEC Publication(s)”). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 60676 has been prepared by IEC technical committee 27: Industrial electroheating.

This third edition cancels and replaces the previous edition published in 2002 and constitutes a technical revision.

Significant technical changes with respect to the previous edition are as follows:

- Clause 1 (*Scope and object*) – types of furnaces are more clearly defined.
- Clause 2 (*Normative references*) and Clause 3 (*Terms and definitions*) have been updated and completed.
- New Clause 4 (*Features of the EAFsystem*) has been added; it mainly concentrates on the tests necessary for high-voltage / high-current electrical equipment in the installation.
- Clause 5 (*Type of tests and general conditions of their performance*) and Clause 6 (*Technical tests*) have been modified according to today's requirements for safe operation of an EAF.

The text of this standard is based on the following documents:

FDIS	Report on voting
27/816/FDIS	27/837/RVD

Full information on the voting for the approval of this standard can be found in the report on voting indicated in the above table.

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC web site under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

- reconfirmed,
- withdrawn,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

INDUSTRIAL ELECTROHEATING EQUIPMENT – TEST METHODS FOR DIRECT ARC FURNACES

1 Scope and object

This International Standard specifies test procedures, conditions and methods according to which the main parameters and the main operational characteristics of electric arc furnaces (EAF) operated either with alternating current (EAFac) or with direct current (EAFdc) with a capacity above 500 kg/heat are established.

The EAF technology is also applicable to furnaces, in which liquid metal is kept at high temperature or superheated to casting temperature (e.g. in a ladle furnace (LF), operated with alternating current).

Test methods for some special equipment, e.g. controlled rectifiers for EAFdc, are covered by IEC 60146-1-1.

Test methods for submerged arc furnaces (SAF) are covered by IEC 60683.

2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60398:1999, *Industrial electroheating installations – General test methods*

IEC 60519-1, *Safety in electroheating installations – Part 1: General requirements*

IEC 60519-4, *Safety in electroheat installations – Part 4: Particular requirements for arc furnace installations*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document the terms and definitions given in IEC 60519-1:2010 and the following apply.

NOTE Refer to International Electrotechnical Vocabulary, IEC 600500, for general definitions. Terms relating to industrial electroheat are defined in IEC 60050-841.

3.1

active power

P

mean value of the instantaneous power *p* (in kW) taken under periodic conditions over one period of time *T* (in h):

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p \, dt$$

NOTE Active power instantaneous value (r.m.s.) measured at any time, including all phases.

[IEC 60050-131:2002, 131-11-42, modified]

3.2 apparent power

S

power rating of the transformer, energizing the EAF (in MVA)

$$S = \sqrt{3} UI \quad (\text{for three-phase EAF})$$

where

U is the voltage, r.m.s., sinusoidal value [in kV]

I is the current, r.m.s. sinusoidal value [in kA]

[IEC 60050-131:2002, 131-11-41, modified]

3.3 arc furnace

furnace with a vessel, in which a metallic charge is heated mainly by electric arc using alternating current (EAFac) or direct current (EAFdc)

[IEC 60050-841:2004, 841-26-05, modified]

3.4 arc furnace transformer

transformer changing medium/high voltage electrical supply to low voltage and high current for an EAF

[IEC 60050-841:2004, 841-26-55, modified]

3.5 asymmetry factor

K

difference between maximum and minimum impedance of any phase, divided by the mean impedance of all three phases (in %)

NOTE Not applicable for EAFdc.

3.6 capacity (of EAF)

volume of liquid material, which can be produced in the EAF (in t)

NOTE Whether metric or short tonnes according to pre-requisites.

[IEC 60050-841:2004, 841-21-40, modified]

3.7 cold state (of EAF installation)

thermal state of EAF installation when the temperature of all parts equals the ambient temperature

3.8 electric arc furnace using alternating current EAFac

furnace, in which electric arcs between the electrodes and the process material are formed, using three-phase alternating current

NOTE Ladle furnace (LF) is operated under the same conditions.

[IEC 60050-841:2004, 841-26-07, modified]

3.9**electric arc furnace using direct current****EAFdc**

furnace, in which the direct current is induced via a bottom electrode (anode) to the material to be processed, forming arcs between the material and the electrode from top (cathode)

[IEC 60050-841:2004, 841-26-06, modified]

3.10**EAF electrode**

part produced from high density graphite to transfer the electrical energy forming arcs between tip and charge material

NOTE In EAFdc, a bottom electrode (anode) is metallic or conductive material in the bottom of an EAF and arcs are formed between the charge material and the graphite electrode from top (cathode).

[IEC 60050-841:2004, 841-26-38, modified]

3.11**electrode clamp**

metallic, water cooled equipment to hold the electrode and supply current for arcing to the electrode

[IEC 60050-841:2004, 841-26-39, modified]

3.12**heat**

mass of liquid material which is tapped after one process from an EAF into a ladle (in t)

3.13**high-current line**

assembly to conduct the high current between transformer secondary bushings and electrode(s) of an EAF

NOTE It consists of the bus bar system, cables and either a current tube system or current conducting electrode arm to the electrodes.

[IEC 60050-841:2004, 841-26-54, modified]

3.14**hot state (of EAF)**

thermal state of an EAF in which the components and charge material are at a temperature above 600 °C and a steady-state temperature of the components is reached

3.15**medium/high-voltage switchgear**

medium/high-voltage switchgear connecting the EAF transformer to the electrical supply by switching on/off under load

NOTE EAF circuit switchgear capable for up to 150 operations under load per day.

3.16**operational short circuit**

short circuit due to direct contact of at least two electrodes in an EAFac with charge/liquid material

NOTE In EAFdc, short circuit is reached if the electrode from top is in contact with the charge/liquid material.

[IEC 60050-841:2004, 841-26-70, modified]

3.17

phase rotation

phase sequence of the electromagnetic field (counter clock wise seen from top of the furnace)

3.18

power factor

cos φ

ratio of the active power to the apparent power measured on the primary side of the transformer

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

where

P is the active power [in MW]

S is the apparent power [in MVA]

NOTE In case of harmonics, power factor is determined according to IEC 60146-1-1.

3.19

power-on time (time p-on)

time (in min) between first arcing and tapping, in which the electrodes are under current

3.20

production rate

total quantity of metal (in t) tapped, divided by the tap-to-tap time (in h)

3.21

reactive power

Q

total reactive electrical power (in MVar) used in the system, measured on the primary side of the transformer

[IEC 60050-131:2002, 131-11-44, modified]

3.22

rectifier for direct current

device by means of which alternating current is transferred into direct current for EAFdc

3.23

reactor

reactor connected in series to the EAFac transformer to minimise impacts on the electrical supply created by the arcs and ensure arc stability during the process

3.24

shell

body of EAF made from steel and covered by a roof

[IEC 60050-841:2004, 841-26-20, modified]

3.25

smoothing choke (shunt reactor)

inductor smoothing electrical high frequency fluctuations in d.c. technology, due to changes in arc conditions

NOTE In case multiple rectifiers are coupled in the system, inductors can decrease the fluctuations as well.

3.26**specific electrical energy consumption**

quotient of electrical energy consumed (in kWh) during melting and superheating of the metal (in t) tapped at a specified temperature

[IEC 60050-841:2004, 841-22-72, modified]

3.27**tap-to-tap time**

t_{ttt}

time (in min) between end of tapping of previous heat and end of tapping of actual heat

4 Features of the EAF system**4.1 General**

In the EAF ferrous metal (e.g. steel or liquid iron) or non-ferrous metal (e.g. copper, nickel or corundum etc.) can be produced. The EAF can be charged with solid or liquid material.

4.2 Electrical assembly of EAF

In the electrical assembly of an EAF the following equipment is included:

a) main circuit, i.e.:

- medium/high voltage supply line including switchgear,
- reactive power compensation (if applicable),
- alternating current series reactor (if applicable),
- EAF transformer,
- high current bus bar system,
- high current cables,
- electrode arm system,
- EAFdc: controlled rectifier and shunt reactor for direct current,
- EAFac: three graphite electrodes from top,
- EAFdc: specific electrode(s) in the bottom and graphite electrode(s) from top;

b) equipment to control all electrical parameters of the installation (i.e. boards, panels, desks, controls measuring and signalling devices etc.).

4.3 Furnace construction

The EAF consists of a vessel, covered by a roof, which can be opened for charging or maintenance.

The EAF is constructed from steel according to its nominal capacity. The bottom is lined with refractory to hold the liquid metal and slag. The side walls above the bottom are either lined with refractory or issued with water cooled side wall panels. The roof is either totally refractory clad or water cooled with a refractory centre piece around the electrodes.

The EAF capacity: according to the free volume of the furnace bottom and the specific density of the respective material to be molten in the EAF. The vessel: in horizontal position, metal surface below defined sill line, which allows the minimum amount of slag on top of the liquid material. Vessel lined according to design definitions.

NOTE Specific density of the respective material to be agreed upon between the supplier and user.

4.4 Water cooling

In specific cases electrical parts of the EAF shall be cooled by water.

NOTE In addition, cooling water is necessary to cool the vessel, roof and hydraulic system.

It shall be differentiated between the following cooling water circuits for the electrical equipment:

- a) transformer, cooled by oil, which is indirectly cooled by water;
- b) high current bus bar system including cables;
- c) electrode arms;
- d) semiconductor devices, cooled by special treated water, which is indirectly cooled by water.

5 Type of tests and general conditions of their performance

5.1 General

Tests shall be in accordance with the specifications given in IEC 60398.

During test procedures IEC 60519-1 and IEC 60519-4 shall be taken into account.

Tests shall be performed independently of the status of the SVC (Static Var Compensation) equipment.

Fluctuations in power supply should be minimal and symmetry of the three phases shall be maximized.

All measurement points are to be agreed upon between the supplier and user.

The type of measurement equipment as well as the layout and arrangement of the measurement points shall be shown in the test report.

5.2 List of tests during cold and hot state

The following tests with respect to the electrical equipment shall be conducted before the EAF is ready for operation and at regular intervals or following repair and modifications:

- a) verification of electrical insulation of the high/medium voltage equipment and the high current lines (see 6.1.2),
- b) cooling water system for transformer and high current system (see 6.2),
- c) speed and motion of electrode system (see 6.3),
- d) phase rotation test (see 6.7),
- e) check of all safety devices and interlocks.

The following tests shall be made in hot state of the EAF:

- f) short circuit during operation (see 6.4),
- g) phase reactance symmetry (see 6.4.4),
- h) specific electrical energy consumption (see 6.5),
- i) specific production rate (see 6.5),
- j) net power-on time (see 6.5.2),
- k) power factor (see 6.5.2),

l) specific electrode consumption (see 6.6).

NOTE Additional tests are covered by commissioning and operation manuals issued by the supplier.

6 Technical tests

6.1 Electrical insulation of high-current system

6.1.1 General

Electrical insulation test shall be carried out on the EAF, empty in cold state without any cooling water in the system (water supply hoses disconnected) and electrodes in position.

EAFdc: transformer (controlled rectifier) and measurement systems on the secondary side shall be disconnected from the high current system.

6.1.2 Insulation resistance

Insulation shall be tested by means of a mega ohmmeter according to IEC 60398:1999, subclauses 7.1.2 and 7.1.3.

The tests shall be performed as follows:

- disconnect furnace transformer (EAFac) or rectifier (EAFdc) from the high current system,
- measure insulation between each phase and the EAF structure (earthed). The minimum value shall be 1 kΩ/V rated voltage.

The insulation test of the bottom electrode(s) shall be performed according to the commissioning or operation manual, issued by the supplier.

6.2 Cooling water system

Tests shall be carried out during normal production and EAF in hot state.

The following specific information of the cooling water is necessary in this respect:

- flow rate (in m³/h),
- inlet and outlet pressure (in bar),
- maximum inlet and outlet temperature (in °C),
- quality (i.e. hardness, conductivity, etc.).

Cooling water composition, properties, pressure and inlet temperature shall be according to supplier's recommendations.

Cooling water flow rate q (in m³/h) shall be calculated according to the following formula:

$$q = \frac{Q_m}{t} \quad (1)$$

where

Q_m is the measured quantity of water [in m³];
 t is the time required for the test [in h].

6.3 Electrode motion speed

Electrode motion is measured using a stop watch for a defined distance in both directions (up and down). Each electrode arm issued with operational length of graphite electrode separately and in case of EAFac all three electrodes together.

NOTE Measurement is possible as well using an electric signal control.

6.4 Short-circuit test procedures

6.4.1 General

a) EAFac

Resistance [R] and reactance [X] of the high current system are determined by measuring the system current and voltage on the primary side of the transformer during short circuit. Values are converted to the high current system on the transformer secondary side according to transformer ratio and vector group.

For transformers with vector groups other than Dd0 (delta/delta without phase shift) the installation shall allow the measurement of the secondary currents with relevant instruments (i.e. Rogowski coils or current transformers).

b) EAFdc

Short circuit test shall be carried out to determine the rated and maximum current of the transformer and rectifier and to evaluate the losses of the high current system.

6.4.2 High current system: resistance and reactance of EAFac

Resistance (R) and reactance (X) values of the high current system are determined by means of a three phase short circuit condition (i.e. measurement of voltage and current in case three electrodes are dipped into the liquid metal at the same time) during normal operation with flat bath conditions (temperature above liquidus point).

Suitable alternative methods shall be agreed between the supplier and user in case the above-mentioned option is not possible due to certain preconditions.

6.4.3 Test procedures

Prior to tests, the EAF transformer shall be switched to suitable low tapping (reactor inserted, when installed) to ensure that the furnace current under the three-phase operational short circuit condition is as close as possible to the rated secondary current of the EAF transformer.

Tests shall be carried out under conditions close to rated current however avoiding damage at involved equipment (i.e. electrodes, transformer etc.).

Prior to the test, the three electrodes shall be adapted to the same length below the arm, to guarantee that the three arms are in the same position during the test. During the test the electrodes shall be dipped into the bath to reach a safe short circuit condition (stabilised fluctuation conditions and power factor reaches the short circuit value $< 0,25$ inductive).

All tests shall be verified by a minimum of two tests. Impedance and asymmetry values are calculated for all tests and the arithmetic average value indicates the short circuit impedance.

Measurement on primary side

I_{1A}, I_{1B}, I_{1C}

U_{1A}, U_{1B}, U_{1C}

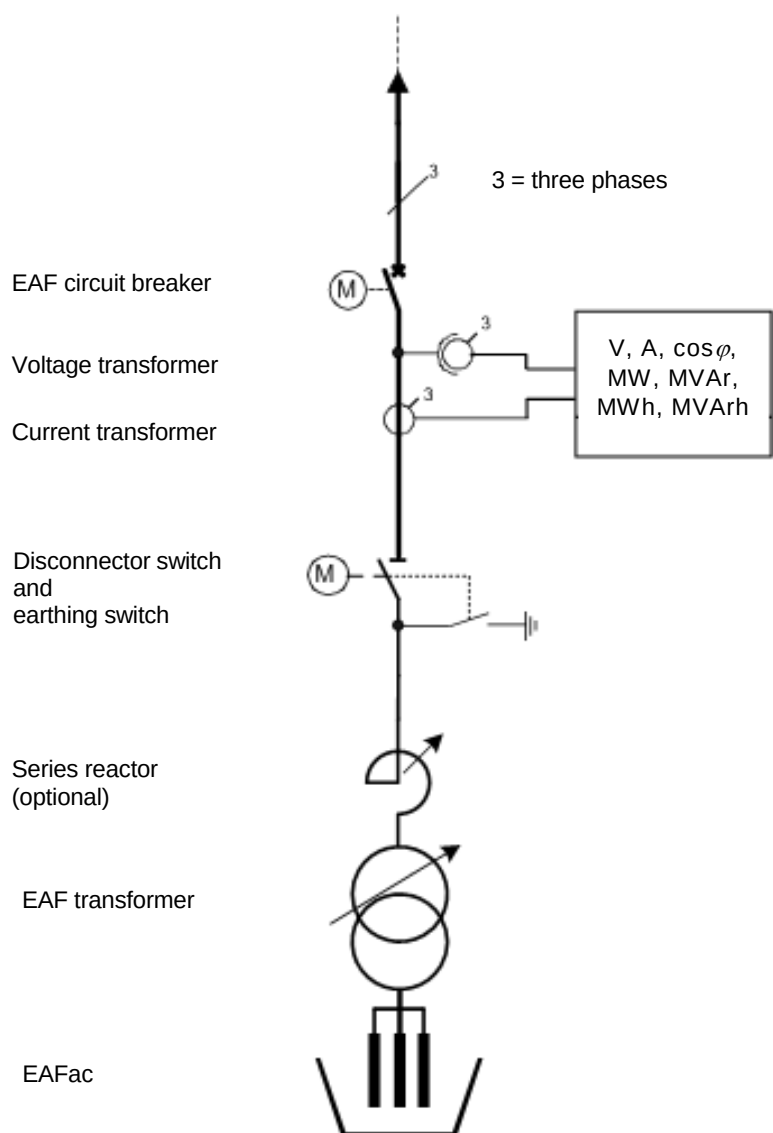
P_{1A}, P_{1B}, P_{1C}

$U_{1AB}, U_{1AC}, U_{1BC}$

$P_{1AB}, P_{1AC}, P_{1BC}$

Calculations of primary values

$$\sum P = P_{1A} + P_{1B} + P_{1C} \quad \text{or} \quad \sum P = P_{1AB} + P_{1BC} \quad \text{according to Figure 1} \quad (2)$$



IEC 2329/11

Figure 1 – Wiring diagram for measuring electrical data of the high current system to determine the resistance and reactance values

Short-circuit test electrode A and B dipped

$$R_{1AB} = \frac{4 \sum P}{(I_{1A} + I_{1B})^2} \quad Z_{1AB} = \frac{2 U_{1AB}}{I_{1A} + I_{1B}} \quad X_{1AB} = \sqrt{Z_{1AB}^2 - R_{1AB}^2} \quad (3)$$

Short-circuit test electrode B and C dipped

$$R_{1BC} = \frac{4 \sum P}{(I_{1B} + I_{1C})^2} \quad Z_{1BC} = \frac{2 U_{1BC}}{I_{1B} + I_{1C}} \quad X_{1BC} = \sqrt{Z_{1BC}^2 - R_{1BC}^2} \quad (4)$$

Short-circuit test electrode A and C dipped

$$R_{1AC} = \frac{4 \sum P}{(I_{1A} + I_{1C})^2} \quad Z_{1AC} = \frac{2 U_{1AC}}{I_{1A} + I_{1C}} \quad X_{1AC} = \sqrt{Z_{1AC}^2 - R_{1AC}^2} \quad (5)$$

NOTE 1 In case U_{1A} , U_{1B} and U_{1C} are measured instead of U_{1AB} , U_{1AC} and U_{1BC} , the phase-phase voltages can be calculated via the vector diagrams of the three single-phase short-circuit tests.

Common analyses for the three single-phase short-circuit tests:

$$R_{1A} = \frac{R_{1AB} + R_{1AC} - R_{1BC}}{2} \quad R_{1B} = \frac{R_{1AB} + R_{1BC} - R_{1AC}}{2} \quad R_{1C} = \frac{R_{1BC} + R_{1AC} - R_{1AB}}{2} \quad (6)$$

$$X_{1A} = \frac{X_{1AB} + X_{1AC} - X_{1BC}}{2} \quad X_{1B} = \frac{X_{1AB} + X_{1BC} - X_{1AC}}{2} \quad X_{1C} = \frac{X_{1BC} + X_{1AC} - X_{1AB}}{2} \quad (7)$$

$$Z_{1A} = \sqrt{R_{1A}^2 + X_{1A}^2} \quad Z_{1B} = \sqrt{R_{1B}^2 + X_{1B}^2} \quad Z_{1C} = \sqrt{R_{1C}^2 + X_{1C}^2} \quad (8)$$

EAF transformer voltage ratio, resistance and reactance

$$k_T = \frac{U_1}{U_2} \quad (9)$$

$$R_{T2A} \approx R_{T2B} \approx R_{T2C} \approx R_{2Tm} = \frac{P_{CuT}}{3 I_{2T}^2} \quad (10)$$

$$X_{2TA} \approx X_{2TB} \approx X_{2TC} \approx X_{2Tm} = \sqrt{\left(\frac{U_{2T}^2 u_{kT}}{100 S_T} \right)^2 - R_{2Tm}^2} \quad (11)$$

High-current line (secondary voltage) for EAF transformers with vector group Dd0 or Yy0

$$R_A \approx \frac{R_{1A}}{k_T^2} - R_{2Tm} \quad R_B \approx \frac{R_{1B}}{k_T^2} - R_{2Tm} \quad R_C \approx \frac{R_{1C}}{k_T^2} - R_{2Tm} \quad (12)$$

$$X_A \approx \frac{X_{1A}}{k_T^2} - X_{2Tm} \quad X_B \approx \frac{X_{1B}}{k_T^2} - X_{2Tm} \quad X_C \approx \frac{X_{1C}}{k_T^2} - X_{2Tm} \quad (13)$$

$$Z_A = \sqrt{R_A^2 + X_A^2} \quad Z_B = \sqrt{R_B^2 + X_B^2} \quad Z_C = \sqrt{R_C^2 + X_C^2} \quad (14)$$

Analysis of three single-phase short-circuit tests for calculating mean values of impedance and reactance according to Figure 1.

$$R_{1, \text{mean}} = \frac{1}{3} \left(\frac{P_{1A}}{I_A^2} + \frac{P_{1B}}{I_B^2} + \frac{P_{1C}}{I_C^2} \right) \quad (15)$$

$$X_{1,\text{mean}} = \frac{1}{3} \left[\sqrt{\left(\frac{U_{1A}}{I_{1A}}\right)^2 - \left(\frac{P_{1A}}{I_{1A}^2}\right)^2} + \sqrt{\left(\frac{U_{1B}}{I_{1B}}\right)^2 - \left(\frac{P_{1B}}{I_{1B}^2}\right)^2} + \sqrt{\left(\frac{U_{1C}}{I_{1C}}\right)^2 - \left(\frac{P_{1C}}{I_{1C}^2}\right)^2} \right] \quad (16)$$

$$Z_{1,\text{mean}} = \sqrt{R_{1,\text{mean}}^2 + X_{1,\text{mean}}^2} \quad (17)$$

Analysis of three-phase short-circuit tests for calculating mean values of impedance and reactance

$$U_{1\text{ phase-ground, mean}} = \frac{U_{1AB} + U_{1AC} + U_{1BC}}{3\sqrt{3}} \quad (18)$$

$$I_{1,\text{mean}} = \frac{I_{1A} + I_{1B} + I_{1C}}{3} \quad (19)$$

$$Z_{1,\text{mean}} = \frac{U_{1\text{phase-ground, mean}}}{I_{1,\text{mean}}} \quad R_{1,\text{mean}} = \frac{P_{1AB} + P_{1BC}}{3 \cdot I_{1,\text{mean}}^2} \quad X_{1,\text{mean}} = \sqrt{Z_{1,\text{mean}}^2 - R_{1,\text{mean}}^2} \quad (20)$$

In these formulae: test conditions: (1) primary side; (2) secondary side; (A, B, C) phases:

I_{1A}, I_{1B}, I_{1C}	is the current per phase;
U_{1A}, U_{1B}, U_{1C}	is the voltage per phase;
P_{1A}, P_{1B}, P_{1C}	is the power per phase;
R_{1A}, R_{1B}, R_{1C}	is the resistance per phase;
X_{1A}, X_{1B}, X_{1C}	is the reactance per phase;
Z_{1A}, Z_{1B}, Z_{1C}	is the impedance per phase;
k_T	is the voltage ratio of the transformer for the tap of the test;
P_{CuT}	is the transformer load losses at rated capacity;
I_{2T}	is the rated secondary transformer current;
U_{2T}	is the rated secondary transformer voltage;
S_T	is the rated apparent power of the transformer;
u_{kT}	is the rated percentage impedance voltage of the transformer;
$R_{2TA}, R_{2TB}, R_{2TC}$	is the secondary phase resistances of the transformer;
R_{2Tm}	is the mean secondary phase resistance of the transformer;
$X_{2TA}, X_{2TB}, X_{2TC}$	is the secondary phase reactance of the transformer;
X_{2Tm}	is the mean secondary phase reactance of the transformer;
R_A, R_B, R_C	is the resistance per phase;
X_A, X_B, X_C	is the reactance per phase;
Z_A, Z_B, Z_C	is the impedance per phase.

NOTE 2 Data concerning the EAF transformer may include the reactor. Special care is necessary in case the reactor is saturated during the test.

NOTE 3 In calculations of characteristics for taps other than those used in the short-circuit test, be aware of different values of the transformer reactance on each tap.

The adopted phase resistance/reactance of the high-current line is the arithmetic mean value of resistance / reactance determined during two or more tests.

6.4.4 Asymmetry factor

The asymmetry factor (K) (in %) is calculated on basis of the value per phase impedances Z_{1A} , Z_{1B} , Z_{1C} by the following formula:

$$K_{as-z} = \frac{Z_{\max} - Z_{\min}}{Z_m} 100 \quad (21)$$

where

$Z_{\max}$ is the maximum impedance per phase;

$Z_{\min}$ is the minimum impedance per phase;

Z_m is the arithmetic mean value of impedance of all three phases.

The impedances shall be measured during the short circuit test as close as possible to the rated secondary current, corresponding to the power rating of the transformer on the primary side. Resistance (R) values not to be considered due to large influences by the electrode dimensions and material.

NOTE Asymmetry (in %) can be derived by measuring the phase reactance (X) according to the following formula:

$$K_{as-x} = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{X_m} 100 \quad (22)$$

where

$X_{\max}$ is the maximum reactance per phase;

$X_{\min}$ is the minimum reactance per phase;

X_m is the arithmetic mean value of reactance of all three phases.

The arithmetic mean value of minimum two measurements represents the test result.

6.5 Main characteristics of EAF during production

6.5.1 General

The following characteristics shall be measured and/or calculated:

- specific electrical energy consumption [in kWh/t],
- production rate [in t/h],
- power factor (in $\cos \varphi$),
- power-on time [in min],
- tap-to-tap time [in min].

6.5.2 Test procedures

The tests shall be carried out during five consecutive heats under normal operation (fume extraction and cleaning systems, if any, in operation). The arithmetic mean value of each test value represents the test result.

Bulk density and main characteristics of the charge material shall be defined between the supplier and user.

The following values are measured and/or calculated:

- a) Specific electrical energy consumption (in kWh/t): electrical energy consumed for the heat divided by the mass of liquid metal (in t) tapped at a specific temperature:

$$e_p = \frac{E_{pt} - E_0}{G} \quad (23)$$

where

E_{pt} is the energy reading following tapping [in kWh];

E_0 is the energy reading prior to test [in kWh];

G is the mass of liquid metal tapped [in t].

NOTE Since e_p is affected by the tapping temperature, power-off time, oxygen consumption etc., the correction for e_p should be according to a formula defined and agreed between the supplier and the user.

- b) Specific production rate p (in t/h) during time t_{ttt} :

$$p = \frac{G}{t_{ttt}} \quad (24)$$

where

G is the mass of liquid metal tapped [in t];

t_{ttt} is the tap-to-tap time [in h].

- c) Power factor $\cos \varphi$ during agreed time of process steps:

$$\cos \varphi = \frac{E_{pt} - E_0}{\sqrt{(E_{pt} - E_0)^2 + (E_{Qt} - E_{Q0})^2}} \quad (25)$$

where

E_{Qt} is the energy reactive after test period [in kVARh];

E_{Q0} is the energy reactive prior to test [in kVARh].

NOTE Energy measurements are made by means of a suitable and verified three phase meter connected to the primary side of the transformer.

- d) Power-on time: the time measured under which the electrodes are under current.

- e) Tap-to-Tap time: operation time measured under specified conditions.

6.6 Electrode consumption

Electrode consumption per mass of liquid metal (in kg/t) is measured during five consecutive test heats. Electrode quality shall be defined and agreed between the supplier and user.

Any electrode breakage or unspecific losses during the test period shall be deducted.

$$g_{el} = \frac{G_{el}}{G} \quad (26)$$

where

g_{el} is the electrode consumption per mass of metal tapped [in kg/t];

G_{el} is the electrode consumption during test heats [in kg];

G is the mass of total tapped material during the test heats [t].

6.7 Phase rotation

Phase rotation shall be measured by a phase sequence meter on the secondary side of the transformer as close as possible to the electrodes. Phase rotation shall be anti clock wise.

Improper phase rotation loosens the electrode nipping and thus could initiate electrode breakage.

6.8 EAF – Rated capacity

Shell, refractory lined and in hot state. Charge material (metallic and additives) and proceedings (melt down, submerged arc heating, deslagging, tapping etc.) shall be according to supplier's recommendations. Reaching final temperature and composition the heat is tapped. The final mass of metal in the ladle shall reach at least the EAF rated capacity.

In case of an EAF using a bottom tapping system, a liquid heel inside the EAF shall be considered.

Bibliography

- [1] IEC 60050 (all parts), *International Electrotechnical Vocabulary* (available at <<http://www.electropedia.org>>)
 - [2] IEC 60146-1-1:2009, *Semiconductor convertors – General requirements and line commutated convertors – Part 1-1: Specifications of basic requirements*
 - [3] IEC 60683:2011, *Industrial electroheating equipment – Test methods for submerged-arc furnaces*
-

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	21
1 Domaine d'application et objet.....	23
2 Références normatives.....	23
3 Termes et définitions	23
4 Caractéristiques du système de four à arc électrique (FAE).....	27
4.1 Généralités.....	27
4.2 Ensemble électrique d'un four à arc électrique (FAE)	27
4.3 Construction du four.....	28
4.4 Refroidissement à l'eau	28
5 Type des essais et conditions générales d'exécution	28
5.1 Généralités.....	28
5.2 Liste des essais à l'état froid et à l'état chaud	29
6 Essais techniques	29
6.1 Isolement électrique du système à haute intensité.....	29
6.1.1 Généralités.....	29
6.1.2 Résistance d'isolement.....	29
6.2 Système d'eau de refroidissement.....	30
6.3 Vitesse de déplacement des électrodes.....	30
6.4 Procédures d'essai de court-circuit.....	30
6.4.1 Généralités.....	30
6.4.2 Système à haute intensité: résistance et réactance d'un four à arc électrique à courant alternatif (FAE c.a.)	31
6.4.3 Procédures d'essai	31
6.4.4 Facteur de dissymétrie	35
6.5 Caractéristiques principales du four à arc pendant la production	35
6.5.1 Généralités.....	35
6.5.2 Procédures d'essai	35
6.6 Consommation d'électrodes	36
6.7 Rotation des phases.....	37
6.8 Four à arc électrique (FAE) – Capacité assignée.....	37
Bibliographie.....	38
Figure 1 – Circuit de mesure des données électriques du système à haute intensité permettant de déterminer les valeurs de résistance et de réactance	32

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**CHAUFFAGE ÉLECTRIQUE INDUSTRIEL –
MÉTHODES D'ESSAI DES FOURS À ARC DIRECT**

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de la CEI"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de la CEI. La CEI n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à la CEI, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de la CEI, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de la CEI peuvent faire l'objet de droits de brevet. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 60676 a été établie par le comité d'études 27 de la CEI: Chauffage électrique industriel.

Cette troisième édition annule et remplace la précédente édition parue en 2002 et constitue une révision technique.

Les principales modifications techniques par rapport à l'édition précédente sont les suivantes:

- Article 1 (*Domaine d'application et objet*) – les types de fours sont définis de façon plus claire.
- L'Article 2 (*Références normatives*) et l'Article 3 (*Termes et définitions*) ont été mis à jour et complétés.
- Un nouvel Article 4 (*Caractéristiques des fours à arc électrique (FAE)*) a été ajouté; il se concentre principalement sur les essais nécessaires pour l'appareillage électrique à haute tension/haute intensité de l'installation.

- L'Article 5 (*Type des essais et conditions générales d'exécution*) et l'Article 6 (*Essais techniques*) ont été modifiés pour s'adapter aux exigences actuelles relatives à la sécurité de fonctionnement d'un four à arc électrique.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
27/816/FDIS	27/837/RVD

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette norme.

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/CEI, Partie 2.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de la CEI sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

- reconduite,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

CHAUFFAGE ÉLECTRIQUE INDUSTRIEL – MÉTHODES D'ESSAI DES FOURS À ARC DIRECT

1 Domaine d'application et objet

La présente Norme internationale spécifie les procédures, les conditions et les méthodes d'essai suivant lesquelles sont établis les principaux paramètres et les principales caractéristiques de fonctionnement des fours à arc électrique (FAE), soit à courant alternatif (FAE c.a.), soit à courant continu (FAE c.c.), dont la capacité est supérieure à 500 kg/charge de fusion.

La technologie des fours à arc électrique (FAE) est également applicable aux fours dans lesquels le métal liquide est maintenu à haute température ou surchauffé à la température de coulage (par exemple dans un four poche fonctionnant en courant alternatif).

Les méthodes d'essai pour certains équipements spéciaux, tels que les redresseurs commandés pour fours à arc électrique à courant continu (FAE c.c.), sont couvertes par la CEI 60146-1-1.

Les méthodes d'essai relatives aux fours à arc submergé (FAS) sont couvertes par la CEI 60683.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

CEI 60398:1999, *Chauffage électrique industriel – Méthodes générales d'essai*

CEI 60519-1, *Sécurité dans les installations électrothermiques – Partie 1: Exigences générales*

CEI 60519-4, *Sécurité dans les installations électrothermiques – Partie 4: Exigences particulières pour les installations de fours à arc*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans la CEI 60519-1:2010, ainsi que les suivants, s'appliquent.

NOTE Se référer au Vocabulaire Electrotechnique International, CEI 60050, pour les définitions générales. Les termes relatifs à l'électrothermie industrielle sont définis dans la CEI 60050-841.

3.1 puissance active

P

moyenne de la puissance instantanée p (en kW), en régime périodique, sur une période de temps T (en h):

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p \, dt$$

NOTE Valeur instantanée de la puissance active (valeur efficace) mesurée à tout moment, en incluant toutes les phases.

[CEI 60050-131:2002, 131-11-42, modifiée]

3.2

puissance apparente

S

puissance assignée du transformateur alimentant le four à arc électrique (FAE) (en MVA)

$$S = \sqrt{3} UI \quad (\text{pour un four à arc électrique triphasé})$$

où

U est la valeur efficace, sinusoïdale, de la tension [en V]

I est la valeur efficace, sinusoïdale, du courant [en A]

[CEI 60050-131:2002, 131-11-41, modifiée]

3.3

four à arc

four comportant une enceinte dans laquelle une charge métallique est chauffée principalement par un arc électrique en courant alternatif (FAE c.a.) ou en courant continu (FAE c.c.)

[CEI 60050-841:2004, 841-26-05, modifiée]

3.4

transformateur de four à arc

transformateur changeant l'alimentation électrique moyenne/haute tension en basse tension et courant élevé pour un four à arc électrique (FAE)

[CEI 60050-841:2004, 841-26-55, modifiée]

3.5

facteur de dissymétrie

K

différence entre l'impédance maximale et minimale d'une phase quelconque, divisée par l'impédance moyenne de l'ensemble des trois phases (en %)

NOTE Non applicable aux fours à arc électrique à courant continu (FAE c.c.).

3.6

capacité (d'un four à arc électrique)

volume de matériau liquide pouvant être produit dans le four à arc électrique (FAE) (en t)

NOTE En tonnes métriques ou en tonnes courtes selon les conditions préalablement définies.

[CEI 60050-841:2004, 841-21-40, modifiée]

3.7

état froid (d'une installation de four à arc électrique)

état thermique d'une installation de four à arc électrique lorsque la température de tous ses éléments est égale à la température ambiante

3.8**four à arc électrique à courant alternatif****FAE c.a.**

four dans lequel des arcs électriques se forment entre les électrodes et le matériau à traiter au moyen d'un courant alternatif triphasé

NOTE Un four poche fonctionne dans les mêmes conditions.

[CEI 60050-841:2004, 841-26-07, modifiée]

3.9**four à arc électrique à courant continu****FAE c.c.**

four dans lequel le courant continu est induit au travers d'une électrode de sole (anode) vers le matériau à traiter, formant des arcs entre le matériau et l'électrode supérieure (cathode)

[CEI 60050-841:2004, 841-26-06, modifiée]

3.10**électrode de four à arc électrique (FAE)**

pièce fabriquée en graphite de haute densité, destinée au transfert de l'énergie électrique formant des arcs entre son extrémité et le matériau chargé

NOTE Dans un four à arc électrique à courant continu (FAE c.c.), une électrode de sole (anode) métallique ou en matériau conducteur est située sur la sole d'un four à arc électrique (FAE) et des arcs se forment entre le matériau chargé et l'électrode supérieure en graphite (cathode).

[CEI 60050-841:2004, 841-26-38, modifiée]

3.11**pince d'électrode**

équipement métallique refroidi à l'eau destiné à maintenir l'électrode et à fournir le courant permettant de former un arc avec l'électrode

[CEI 60050-841:2004, 841-26-39, modifiée]

3.12**charge de fusion**

masses de matériau liquide s'écoulant après traitement d'un four à arc électrique (FAE) dans une poche (en t)

3.13**ligne à haute intensité**

ensemble destiné à conduire le courant élevé entre les traversées secondaires du transformateur et l'(ou les) électrode(s) d'un four à arc électrique (FAE)

NOTE Elle comprend le système de jeu de barres, les câbles et un système de tubes de courant ou un bras d'électrode conducteur relié aux électrodes.

[CEI 60050-841:2004, 841-26-54, modifiée]

3.14**état chaud (d'un four à arc électrique)**

état thermique d'un four à arc électrique dans lequel les composants et le matériau chargé se trouvent à une température supérieure à 600 °C et une température constante des composants est atteinte

3.15**commutateur moyenne/haute tension**

commutateur moyenne/haute tension reliant le transformateur d'un four à arc électrique à l'alimentation électrique par une commutation marche/arrêt en charge

NOTE Commutateur de circuit de four à arc électrique (FAE) capable d'atteindre 150 manœuvres en charge par jour.

3.16

court-circuit de fonctionnement

court-circuit dû au contact direct de deux électrodes au moins dans un four à arc électrique à courant alternatif (FAE c.a.) avec un matériau chargé/liquide

NOTE Dans un four à arc électrique à courant continu (FAE c.c.), un court-circuit se produit si l'électrode supérieure est en contact avec le matériau chargé/liquide.

[CEI 60050-841:2004, 841-26-70, modifiée]

3.17

rotation de phase

séquence de phases du champ électromagnétique (dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, observée du dessus du four)

3.18

facteur de puissance

$\cos \varphi$

rapport de la puissance active à la puissance apparente, mesuré sur le côté primaire du transformateur

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

où

P est la puissance active [en MW]

S est la puissance apparente [en MVA]

NOTE Dans le cas des harmoniques, le facteur de puissance est déterminé conformément à la CEI 60146-1-1.

3.19

temps de maintien de la puissance

temps (en min) entre le premier amorçage de l'arc et la coulée, durant lequel les électrodes sont alimentées en courant

3.20

taux de production

quantité totale de métal coulé (en t), divisée par le temps de coulée à coulée (en h)

3.21

puissance réactive

Q

puissance électrique réactive totale (en MVar) utilisée dans le système, mesurée sur le côté primaire du transformateur

[CEI 60050-131:2002, 131-11-44, modifiée]

3.22

redresseur pour courant continu

dispositif au moyen duquel un courant alternatif est transformé en courant continu pour les fours à arc électrique à courant continu (FAE c.c.)

3.23**inductance**

inductance connectée en série au transformateur d'un four à arc électrique (FAE c.a.) afin de limiter les impacts sur l'alimentation électrique provoqués par les arcs et d'assurer la stabilité de ceux-ci pendant le procédé

3.24**cuve**

partie d'un four à arc électrique (FAE) réalisée en acier et recouverte d'une voûte

[CEI 60050-841:2004, 841-26-20, modifiée]

3.25**inductance de lissage (bobine d'inductance shunt)**

bobine d'inductance permettant le lissage des fluctuations électriques de haute fréquence dans les appareillages en courant continu, dues à des modifications des conditions d'arc

NOTE Si des redresseurs multiples sont couplés dans le système, les bobines d'inductance peuvent également réduire les fluctuations.

3.26**consommation d'énergie électrique spécifique**

quotient de l'énergie électrique consommée (en kWh) durant la fusion et la surchauffe du métal (en t) coulé à une température spécifiée

[CEI 60050-841:2004, 841-22-72, modifiée]

3.27**temps de coulée à coulée**

t_{ttt}

temps (en min) séparant la fin de la coulée de la charge de fusion précédente et la fin de la coulée de la charge de fusion actuelle

4 Caractéristiques du système de four à arc électrique (FAE)**4.1 Généralités**

Dans le four à arc électrique, on peut produire du métal ferreux (acier ou fer liquide, par exemple) ou du métal non ferreux (cuivre, nickel ou corindon, etc., par exemple). Le four à arc électrique peut être chargé avec un matériau solide ou liquide.

4.2 Ensemble électrique d'un four à arc électrique (FAE)

L'ensemble électrique d'un four à arc électrique (FAE) comprend les équipements suivants:

a) circuit principal, comportant:

- la ligne d'alimentation moyenne/haute tension incluant le commutateur,
- la compensation de puissance réactive (le cas échéant),
- la bobine d'inductance en série à courant alternatif (le cas échéant),
- le transformateur du four à arc électrique (FAE),
- le système de jeu de barres à courant élevé,
- les câbles à haute tension,
- le système de bras d'électrode,
- FAE c.c.: le redresseur commandé et la bobine d'inductance shunt pour courant continu,

- FAE c.a.: les trois électrodes supérieures en graphite,
 - FAE c.c.: l'(ou les) électrode(s) spécifique(s) sur la sole et l'(ou les) électrode(s) supérieure(s) en graphite;
- b) le matériel pour la commande de tous les paramètres électriques de l'installation (tel que panneaux, pupitres, bureaux, commandes, dispositifs de mesure et de signalisation etc.).

4.3 Construction du four

Le four à arc électrique (FAE) est constitué d'une enceinte recouverte d'une voûte, qui peut être ouverte pour le chargement ou la maintenance.

Le four à arc électrique (FAE) est construit en acier suivant sa capacité nominale. Le fond est revêtu de réfractaire pour recevoir le métal liquide et le laitier. Les parois latérales au-dessus du fond sont revêtues de réfractaire ou équipées de panneaux latéraux refroidis à l'eau. La voûte est soit totalement revêtue de réfractaire, soit refroidie à l'eau par une pièce centrale réfractaire entourant les électrodes.

Capacité du four à arc électrique (FAE): elle dépend du volume libre du fond du four et de la densité spécifique du matériau destiné à être fondu dans le four à arc électrique. Enceinte: en position horizontale, la surface du métal est située en-dessous de la ligne de décrassage définie, ce qui permet d'obtenir une quantité minimale de laitier sur le matériau liquide. L'enceinte est revêtue suivant les définitions de conception.

NOTE Il convient que la densité spécifique du matériau concerné fasse l'objet d'un accord entre le fournisseur et l'utilisateur.

4.4 Refroidissement à l'eau

Dans certains cas, les parties électriques du four à arc électrique (FAE) doivent être refroidies à l'eau.

NOTE De plus, l'eau de refroidissement est nécessaire pour refroidir l'enceinte, la voûte et le système hydraulique.

On doit faire la distinction entre les circuits de refroidissement à l'eau suivants concernant l'équipement électrique:

- a) le transformateur, refroidi à l'huile, qui est indirectement refroidie à l'eau;
- b) le système de jeu de barres à courant élevé, incluant les câbles;
- c) les bras d'électrode;
- d) les dispositifs à semi-conducteurs, refroidis avec une eau spécialement traitée, qui est indirectement refroidie à l'eau.

5 Type des essais et conditions générales d'exécution

5.1 Généralités

Les essais doivent être réalisés conformément aux spécifications données dans la CEI 60398.

La CEI 60519-1 et la CEI 60519-4 doivent être prises en compte au cours des procédures d'essai.

Les essais doivent être réalisés indépendamment du statut de l'équipement de compensation statique d'énergie réactive.

Il convient de limiter les fluctuations de puissance et la symétrie des trois phases doit être optimisée.

Tous les points de mesure doivent faire l'objet d'un accord entre le fournisseur et l'utilisateur.

Le type de matériel de mesure ainsi que la disposition et l'organisation des points de mesure doivent être présentés dans le rapport d'essais.

5.2 Liste des essais à l'état froid et à l'état chaud

Les essais suivants doivent être réalisés sur l'équipement électrique avant de mettre le four à arc électrique (FAE) en fonctionnement et à intervalles réguliers ou en cas de réparations et de modifications:

- a) vérification de l'isolation électrique de l'équipement haute/moyenne tension et des lignes à haute intensité (voir 6.1.2),
- b) vérification du système de refroidissement à l'eau du transformateur et du système à haute intensité (voir 6.2),
- c) mesure de la vitesse de déplacement du système d'électrodes (voir 6.3),
- d) essai du sens de rotation des phases (voir 6.7),
- e) vérification de tous les dispositifs de sécurité et de verrouillage.

Les essais suivants doivent être réalisés à l'état chaud sur le four à arc électrique (FAE):

- f) essai de court-circuit en fonctionnement (voir 6.4),
- g) symétrie de la réactance de phase (voir 6.4.4),
- h) consommation d'énergie électrique spécifique (voir 6.5),
- i) taux de production spécifique (voir 6.5),
- j) temps net de maintien de la puissance (voir 6.5.2),
- k) facteur de puissance (voir 6.5.2),
- l) consommation spécifique d'électrodes (voir 6.6).

NOTE Des essais supplémentaires sont couverts par les manuels de mise en service et d'utilisation établis par le fournisseur.

6 Essais techniques

6.1 Isolement électrique du système à haute intensité

6.1.1 Généralités

L'essai d'isolement électrique doit être effectué sur le four à arc électrique (FAE) vide, à l'état froid, sans aucune présence d'eau de refroidissement dans le système (tuyaux flexibles d'alimentation en eau débranchés) et les électrodes étant en place.

FAE c.c.: le transformateur (redresseur commandé) et les systèmes de mesure sur le côté secondaire doivent être déconnectés du système à haute intensité.

6.1.2 Résistance d'isolement

L'essai d'isolement doit être effectué au moyen d'un mégohmmètre conformément à la CEI 60398:1999, paragraphes 7.1.2 et 7.1.3.

Les essais doivent être réalisés comme suit:

- déconnecter le transformateur du four (FAE c.a.) ou le redresseur (FAE c.c.) du système à haute intensité,
- mesurer l'isolement entre chaque phase et la structure du four à arc électrique (FAE) (reliée à la terre). La valeur minimale doit être égale à 1 kΩ/V de tension assignée.

L'essai d'isolement de l'(des) électrode(s) de sole doit être réalisé conformément au manuel de mise en service ou d'utilisation établi par le fournisseur.

6.2 Système d'eau de refroidissement

Les essais doivent être effectués en période de production normale et lorsque le four à arc électrique (FAE) est à l'état chaud.

Les informations spécifiques suivantes relatives à l'eau de refroidissement sont nécessaires:

- le débit (en m³/h),
- la pression d'entrée et de sortie (en bar),
- la température maximale d'entrée et de sortie (en °C),
- la qualité (c'est-à-dire la dureté, la conductivité, etc.).

La composition, les propriétés, la pression et la température d'entrée de l'eau de refroidissement doivent correspondre aux recommandations du fournisseur.

Le débit de l'eau de refroidissement q (en m³/h) doit être calculé selon la formule suivante:

$$q = \frac{Q_m}{t} \quad (1)$$

où

Q_m est la quantité d'eau mesurée [en m³];
 t est le temps nécessaire pour réaliser l'essai [en h].

6.3 Vitesse de déplacement des électrodes

Le déplacement des électrodes est mesuré au moyen d'une montre chronographe sur une distance définie, dans les deux sens (vers le haut et vers le bas). On attribue à chaque bras d'électrode une longueur opérationnelle séparément pour chaque électrode en graphite et dans le cas d'un four à arc électrique à courant alternatif (FAE c.a.) pour les trois électrodes ensemble.

NOTE La mesure est possible également en utilisant une commande à signaux électriques.

6.4 Procédures d'essai de court-circuit

6.4.1 Généralités

a) FAE c.a.

La résistance $[R]$ et la réactance $[X]$ du système à haute intensité sont déterminées en mesurant le courant et la tension du système sur le côté primaire du transformateur pendant un court-circuit. Les valeurs sont converties en valeurs du système à haute intensité sur le côté secondaire du transformateur selon le rapport et le couplage des enroulements du transformateur.

Pour les transformateurs présentant un couplage des enroulements autre que Dd0 (delta/delta sans déphasage), l'installation doit permettre la mesure des courants secondaires avec les instruments correspondants (tels que les bobines Rogowski ou les transformateurs de courant).

b) FEA c.c.

L'essai de court-circuit doit être effectué afin de déterminer le courant maximal assigné du transformateur et du redresseur et afin d'évaluer les pertes du système à haute intensité.

6.4.2 Système à haute intensité: résistance et réactance d'un four à arc électrique à courant alternatif (FAE c.a.)

Les valeurs de résistance (R) et de réactance (X) du système à haute intensité sont déterminées dans des conditions de court-circuit triphasé (c'est-à-dire que la tension et le courant sont mesurés tandis que trois électrodes sont plongées simultanément dans le métal liquide), en fonctionnement normal, dans des conditions de bain plat (température supérieure au point de fusion).

D'autres méthodes valables doivent faire l'objet d'un accord entre le fournisseur et l'utilisateur si l'option mentionnée ci-dessus n'est pas réalisable en raison de certaines conditions préalables.

6.4.3 Procédures d'essai

Avant les essais, le transformateur du four à arc électrique (FAE) doit être mis en service sur une prise suffisamment basse (et la bobine d'inductance mise en service, si elle existe) pour s'assurer que le courant du four dans les conditions de court-circuit triphasé en service est aussi voisin que possible du courant assigné secondaire du transformateur du four à arc électrique (FAE).

Les essais doivent être effectués dans des conditions proches du courant assigné mais en évitant cependant d'endommager l'équipement concerné (tel que les électrodes, le transformateur, etc.).

Avant l'essai, les trois électrodes doivent être réglées à la même longueur en dessous du bras afin de garantir que les trois bras sont dans la même position au cours de l'essai. Durant l'essai, les électrodes doivent être plongées dans le bain pour atteindre une condition de court-circuit sûre (conditions de fluctuations stabilisées et facteur de puissance atteignant la valeur de court-circuit $< 0,25$ en courant inductif).

Tous les essais doivent être vérifiés par deux essais au moins. Les valeurs d'impédance et de dissymétrie sont calculées pour tous les essais et la valeur moyenne arithmétique indique l'impédance de court-circuit.

Mesure du côté primaire

$$I_{1A}, I_{1B}, I_{1C}$$

$$U_{1A}, U_{1B}, U_{1C}$$

$$P_{1A}, P_{1B}, P_{1C}$$

$$U_{1AB}, U_{1AC}, U_{1BC}$$

$$P_{1AB}, P_{1AC}, P_{1BC}$$

Calculs des valeurs primaires

$$\sum P = P_{1A} + P_{1B} + P_{1C} \quad \text{ou} \quad \sum P = P_{1AB} + P_{1BC} \quad \text{conformément à la Figure 1} \quad (2)$$

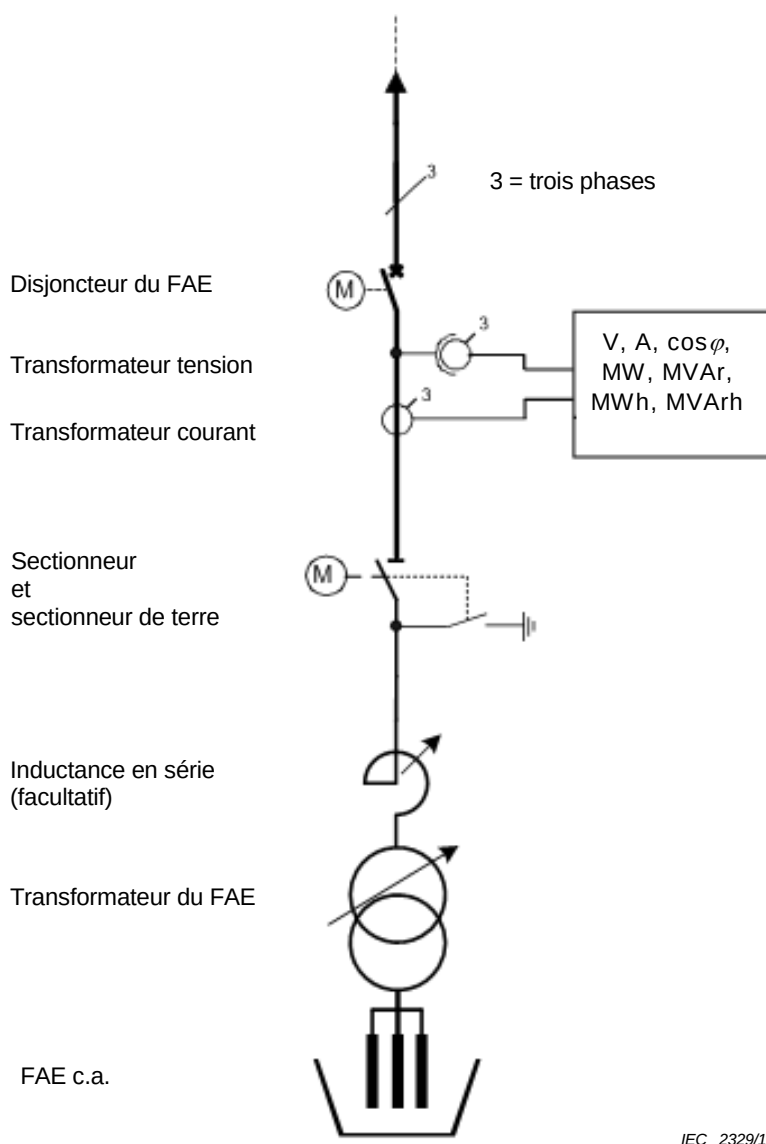


Figure 1 – Circuit de mesure des données électriques du système à haute intensité permettant de déterminer les valeurs de résistance et de réactance

Electrode d'essai de court-circuit A et B plongée

$$R_{1AB} = \frac{4 \sum P}{(I_{1A} + I_{1B})^2} \quad Z_{1AB} = \frac{2U_{1AB}}{I_{1A} + I_{1B}} \quad X_{1AB} = \sqrt{Z_{1AB}^2 - R_{1AB}^2} \quad (3)$$

Electrode d'essai de court-circuit B et C plongée

$$R_{1BC} = \frac{4 \sum P}{(I_{1B} + I_{1C})^2} \quad Z_{1BC} = \frac{2U_{1BC}}{I_{1B} + I_{1C}} \quad X_{1BC} = \sqrt{Z_{1BC}^2 - R_{1BC}^2} \quad (4)$$

Electrode d'essai de court-circuit A et C plongée

$$R_{1AC} = \frac{4 \sum P}{(I_{1A} + I_{1C})^2} \quad Z_{1AC} = \frac{2 U_{1AC}}{I_{1A} + I_{1C}} \quad X_{1AC} = \sqrt{Z_{1AC}^2 - R_{1AC}^2} \quad (5)$$

NOTE 1 Si U_{1A} , U_{1B} et U_{1C} sont mesurées au lieu de U_{1AB} , U_{1AC} et U_{1BC} , les tensions entre phases peuvent être calculées en utilisant les schémas de vecteur des trois essais de court-circuit monophasés.

Analyses communes pour les trois essais de court-circuit monophasés:

$$R_{1A} = \frac{R_{1AB} + R_{1AC} - R_{1BC}}{2} \quad R_{1B} = \frac{R_{1AB} + R_{1BC} - R_{1AC}}{2} \quad R_{1C} = \frac{R_{1BC} + R_{1AC} - R_{1AB}}{2} \quad (6)$$

$$X_{1A} = \frac{X_{1AB} + X_{1AC} - X_{1BC}}{2} \quad X_{1B} = \frac{X_{1AB} + X_{1BC} - X_{1AC}}{2} \quad X_{1C} = \frac{X_{1BC} + X_{1AC} - X_{1AB}}{2} \quad (7)$$

$$Z_{1A} = \sqrt{R_{1A}^2 + X_{1A}^2} \quad Z_{1B} = \sqrt{R_{1B}^2 + X_{1B}^2} \quad Z_{1C} = \sqrt{R_{1C}^2 + X_{1C}^2} \quad (8)$$

Rapport des tensions du transformateur de four à arc électrique (FAE), résistance et réactance

$$k_T = \frac{U_1}{U_2} \quad (9)$$

$$R_{T2A} \approx R_{T2B} \approx R_{T2C} \approx R_{2Tm} = \frac{P_{CuT}}{3 I_{2T}^2} \quad (10)$$

$$X_{2TA} \approx X_{2TB} \approx X_{2TC} \approx X_{2Tm} = \sqrt{\left(\frac{U_{2T}^2 u_{kT}}{100 S_T} \right)^2 - R_{2Tm}^2} \quad (11)$$

Ligne à haute intensité (tension secondaire) pour transformateurs de four à arc électrique (FAE) avec couplage des enroulements Dd ou Yy

$$R_A \approx \frac{R_{1A}}{k_T^2} - R_{2Tm} \quad R_B \approx \frac{R_{1B}}{k_T^2} - R_{2Tm} \quad R_C \approx \frac{R_{1C}}{k_T^2} - R_{2Tm} \quad (12)$$

$$X_A \approx \frac{X_{1A}}{k_T^2} - X_{2Tm} \quad X_B \approx \frac{X_{1B}}{k_T^2} - X_{2Tm} \quad X_C \approx \frac{X_{1C}}{k_T^2} - X_{2Tm} \quad (13)$$

$$Z_A = \sqrt{R_A^2 + X_A^2} \quad Z_B = \sqrt{R_B^2 + X_B^2} \quad Z_C = \sqrt{R_C^2 + X_C^2} \quad (14)$$

Analyse des trois essais de court-circuit monophasé pour le calcul des valeurs moyennes d'impédance et de réactance conformément à la Figure 1.

$$R_{1,moyenne} = \frac{1}{3} \left(\frac{P_{1A}}{I_A^2} + \frac{P_{1B}}{I_B^2} + \frac{P_{1C}}{I_C^2} \right) \quad (15)$$

$$X_{1,\text{moyenne}} = \frac{1}{3} \left[\sqrt{\left(\frac{U_{1A}}{I_{1A}}\right)^2 - \left(\frac{P_{1A}}{I_{1A}^2}\right)^2} + \sqrt{\left(\frac{U_{1B}}{I_{1B}}\right)^2 - \left(\frac{P_{1B}}{I_{1B}^2}\right)^2} + \sqrt{\left(\frac{U_{1C}}{I_{1C}}\right)^2 - \left(\frac{P_{1C}}{I_{1C}^2}\right)^2} \right] \quad (16)$$

$$Z_{1,\text{moyenne}} = \sqrt{R_{1,\text{moyenne}}^2 + X_{1,\text{moyenne}}^2} \quad (17)$$

Analyse des essais de court-circuit triphasé pour le calcul des valeurs moyennes d'impédance et de réactance

$$U_{1\text{ phase-terre, moyenne}} = \frac{U_{1AB} + U_{1AC} + U_{1BC}}{3\sqrt{3}} \quad (18)$$

$$I_{1,\text{moyenne}} = \frac{I_{1A} + I_{1B} + I_{1C}}{3} \quad (19)$$

$$Z_{1,\text{moyenne}} = \frac{U_{1\text{ phase-terre, moyenne}}}{I_{1,\text{moyenne}}} \quad R_{1,\text{moyenne}} = \frac{P_{1AB} + P_{1BC}}{3 \cdot I_{1,\text{moyenne}}^2} \quad (20)$$

$$X_{1,\text{moyenne}} = \sqrt{Z_{1,\text{moyenne}}^2 - R_{1,\text{moyenne}}^2}$$

Dans ces formules: conditions d'essais: (1) côté primaire; (2) côté secondaire; phases (A, B, C):

I_{1A}, I_{1B}, I_{1C}	est le courant par phase;
U_{1A}, U_{1B}, U_{1C}	est la tension par phase;
P_{1A}, P_{1B}, P_{1C}	est la puissance par phase;
R_{1A}, R_{1B}, R_{1C}	est la résistance par phase;
X_{1A}, X_{1B}, X_{1C}	est la réactance par phase;
Z_{1A}, Z_{1B}, Z_{1C}	est l'impédance par phase;
k_T	est le rapport des tensions du transformateur pour la prise de l'essai;
P_{CuT}	sont les pertes de charge du transformateur à la capacité assignée;
I_{2T}	est le courant secondaire assigné du transformateur;
U_{2T}	est la tension secondaire assignée du transformateur;
S_T	est la puissance apparente assignée du transformateur;
u_{kT}	est la tension d'impédance assignée, exprimée en pourcentage, du transformateur;
$R_{2TA}, R_{2TB}, R_{2TC}$	sont les résistances de phase secondaire du transformateur;
R_{2Tm}	est la résistance de phase secondaire moyenne du transformateur;
$X_{2TA}, X_{2TB}, X_{2TC}$	est la réactance de phase secondaire du transformateur;
X_{2Tm}	est la réactance de phase secondaire moyenne du transformateur;
R_A, R_B, R_C	est la résistance par phase;
X_A, X_B, X_C	est la réactance par phase;
Z_A, Z_B, Z_C	est l'impédance par phase.

NOTE 2 Les données concernant le transformateur du four à arc électrique peuvent inclure l'influence de la bobine d'inductance. Il est nécessaire de prendre des précautions spéciales dans le cas où la bobine d'inductance serait saturée pendant l'essai.

NOTE 3 Dans le calcul des caractéristiques sur les prises autres que celles utilisées lors de l'essai de court-circuit, il faut prendre en compte les différentes valeurs de la réactance du transformateur sur chaque prise.

La résistance/réactance de phase adoptée pour la ligne à haute intensité est la valeur moyenne arithmétique de la résistance/réactance déterminée au cours de deux essais ou plus.

6.4.4 Facteur de dissymétrie

Le facteur de dissymétrie (K) (en %) est calculé à partir de la formule suivante sur la base des valeurs d'impédances par phase Z_{1A} , Z_{1B} , Z_{1C} :

$$K_{as-z} = \frac{Z_{\max} - Z_{\min}}{Z_m} 100 \quad (21)$$

où

$Z_{\max}$ est l'impédance maximale par phase;

$Z_{\min}$ est l'impédance minimale par phase;

Z_m est la valeur moyenne arithmétique de l'impédance de l'ensemble des trois phases.

Les impédances doivent être mesurées durant l'essai de court-circuit aussi près que possible du courant secondaire assigné, correspondant à la puissance assignée du transformateur sur le côté primaire. Les valeurs de résistance (R) ne doivent pas être prises en considération en raison de l'influence importante des dimensions et du matériau de l'électrode.

NOTE La dissymétrie (en %) peut être dérivée en mesurant la réactance de phase (X) à partir de la formule suivante:

$$K_{as-x} = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{X_m} 100 \quad (22)$$

où

$X_{\max}$ est la réactance maximale par phase;

$X_{\min}$ est la réactance minimale par phase;

X_m est la valeur moyenne arithmétique des réactances des trois phases.

La valeur moyenne arithmétique de deux mesures ou plus constitue le résultat d'essai.

6.5 Caractéristiques principales du four à arc pendant la production

6.5.1 Généralités

Les caractéristiques suivantes doivent être mesurés et/ou calculés :

- consommation spécifique d'énergie électrique [en kWh/t],
- taux de production [en t/h],
- facteur de puissance (en $\cos \varphi$),
- temps de maintien de la puissance [en min],
- temps de coulée à coulée [en min].

6.5.2 Procédures d'essai

Les essais doivent être effectués sur cinq charges de fusion consécutives dans des conditions normales de fonctionnement (les systèmes d'évacuation de fumée et d'épuration, s'ils existent, étant en fonctionnement). La valeur moyenne arithmétique de chaque valeur d'essai représente le résultat d'essai.

La masse volumique et les caractéristiques principales du matériau chargé doivent être définies conjointement par le fournisseur et l'utilisateur.

Les valeurs suivantes sont mesurés et/ou calculés:

- a) Consommation d'énergie électrique spécifique (en kWh/t): énergie électrique consommée pour la charge de fusion divisée par le masse de métal liquide (en t) coulé à une température spécifique:

$$e_p = \frac{E_{pt} - E_0}{G} \quad (23)$$

où

E_{pt} est la lecture de la mesure d'énergie à la fin de la coulée [en kWh];

E_0 est la lecture de la mesure d'énergie avant l'essai [en kWh];

G est la masse du métal liquide coulé [en t].

NOTE Etant donné que e_p est influencée par la température de perçage, le temps d'arrêt de la puissance, la consommation d'oxygène, etc., il convient de corriger e_p selon une formule définie conjointement par le fournisseur et l'utilisateur.

- b) Taux de production spécifique p (en t/h) pendant le temps t_{ttt} :

$$p = \frac{G}{t_{ttt}} \quad (24)$$

où

G est la masse du métal liquide coulé [en t];

t_{ttt} est le temps de coulée à coulée [en h].

- c) Facteur de puissance $\cos \varphi$ pendant la durée convenue des étapes du processus:

$$\cos \varphi = \frac{E_{pt} - E_0}{\sqrt{(E_{pt} - E_0)^2 + (E_{Qt} - E_{Q0})^2}} \quad (25)$$

où

E_{Qt} est l'énergie réactive après la période d'essai [en kVAh];

E_{Q0} est l'énergie réactive avant l'essai [en kVAh].

NOTE La mesure des énergies est réalisée au moyen d'un appareil de mesure triphasé convenable et vérifié, connecté au côté primaire du transformateur.

- d) Temps de maintien de la puissance: temps mesuré pendant lequel les électrodes sont alimentées en courant.

- e) Temps de coulée à coulée: temps de fonctionnement mesuré dans des conditions spécifiques.

6.6 Consommation d'électrodes

La consommation d'électrodes par masse de métal liquide (en kg/t) est mesurée pendant cinq charges de fusion d'essai consécutives. La qualité des électrodes doit être définie et doit faire l'objet d'un accord entre le fournisseur et l'utilisateur.

Toute cassure des électrodes ou toute perte non spécifique durant la période d'essai doit être déduite.

$$g_{el} = \frac{G_{el}}{G} \quad (26)$$

où

g_{el} est la consommation d'électrodes par tonne de métal coulé [en kg/t];

G_{el} est la consommation d'électrodes durant les charges de fusion d'essai [en kg];

G est le poids de la totalité du matériau coulé durant les charges de fusion d'essai [en t].

6.7 Rotation des phases

La rotation des phases doit être mesurée par un appareil de mesure de séquences de phases sur le côté secondaire du transformateur de manière aussi rapprochée que possible des électrodes. La rotation des phases doit se faire dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.

Un mauvais sens de rotation des phases provoque le desserrage des électrodes, et peut ainsi être à l'origine d'une cassure de ces électrodes.

6.8 Four à arc électrique (FAE) – Capacité assignée

Cuve, revêtue de réfractaire et à l'état chaud. Le matériau chargé (métal et additifs) ainsi que les procédures (fusion, chauffage à l'arc submergé, décrassage, coulée, etc.) doivent être conformes aux recommandations du fournisseur. Lorsque la température et la composition finales sont atteintes, la charge de fusion est coulée. Le poids métallique final du matériau dans la poche de coulée doit atteindre au minimum la capacité assignée du four à arc électrique (FAE).

Dans le cas d'un four à arc électrique (FAE) avec coulée par le fond, on doit envisager la présence d'un fond liquide à l'intérieur du four.

Bibliographie

- [1] CEI 60050 (toutes les parties), *Vocabulaire Electrotechnique International* (disponible à l'adresse <<http://www.electropedia.org>>)
 - [2] CEI 60146-1-1, *Convertisseurs à semiconducteurs – Exigences générales et convertisseurs commutés par le réseau – Partie 1-1: Spécification des exigences de base*
 - [3] CEI 60683 :2011, *Chauffage électrique industriel – Méthodes d'essai des fours a arc submergé*
-

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

3, rue de Varembé
PO Box 131
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel: + 41 22 919 02 11
Fax: + 41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch