

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Industrial electroheating equipment – Test methods for direct arc furnaces

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60676:2024



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2024 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 l'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC de votre pays de résidence.

IEC Secretariat
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11
info@iec.ch
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 corrigendum or an amendment might have been published.

IEC publications search - webstore.iec.ch/advsearchform

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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details all new publications released. Available online and once a month by email.

IEC Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre: sales@iec.ch.

IEC Products & Services Portal - products.iec.ch

Discover our powerful search engine and read freely all the publications previews, graphical symbols and the glossary. With a subscription you will always have access to up to date content tailored to your needs.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary on electrotechnology, containing more than 22 500 terminological entries in English and French, with equivalent terms in 25 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

A propos de l'IEC

La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) 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 IEC

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

Recherche de publications IEC -

webstore.iec.ch/advsearchform

La recherche avancée permet de trouver des publications IEC en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études, ...). Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Restez informé sur les nouvelles publications IEC. Just Published détaille les nouvelles publications parues. Disponible en ligne et une fois par mois par email.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions contactez-nous: sales@iec.ch.

IEC Products & Services Portal - products.iec.ch

Découvrez notre puissant moteur de recherche et consultez gratuitement tous les aperçus des publications, symboles graphiques et le glossaire. Avec un abonnement, vous aurez toujours accès à un contenu à jour adapté à vos besoins.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire d'électrotechnologie en ligne au monde, avec plus de 22 500 articles terminologiques en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 25 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

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

ICS 25.180.10

ISBN 978-2-8322-8367-7

Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.
Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.

CONTENTS

FOREWORD.....	4
INTRODUCTION.....	6
1 Scope.....	7
2 Normative references	7
3 Terms, definitions and abbreviated terms	8
3.1 Terms and definitions.....	8
3.2 Abbreviated terms.....	12
4 Basic provisions for testing and test conditions.....	13
4.1 Aim of testing.....	13
4.2 Communication of test results	13
4.3 Boundaries of the energy using system for testing	13
4.3.1 General considerations	13
4.3.2 Batch type installations	13
4.3.3 Continuous type installations	14
4.4 General requirements for testing.....	14
4.5 Operating conditions during tests.....	14
4.6 Environmental conditions during tests	14
4.7 Supply voltage	14
5 Comparing equipment or installations	15
6 Measurements and charged material	15
6.1 General.....	15
6.2 Time resolution	15
6.3 Frequency measurement.....	15
6.4 Measurement of electrical data	15
6.4.1 Supply voltage and current	15
6.4.2 Voltage, current, electrical power and resistance	15
6.4.3 Measurement positions.....	16
6.5 Temperature measurement	16
6.5.101 Dipping probes for liquid steel or slag.....	16
6.6 Measurement of pressure, humidity or composition of fluids.....	16
6.7 Charged material	16
7 Numerical modelling	17
8 Technical tests	18
8.101 General.....	18
8.102 Electrical insulation.....	18
8.103 Cold function test.....	18
8.104 Hot commissioning.....	18
8.104.1 General	18
8.104.2 Energy consumption during holding operation.....	18
8.104.3 Energy consumption during normal operation	19
8.104.4 Rated arc furnace capacity	19
8.105 Preparation for performance test.....	19
8.105.1 Performance dependence on supply voltage.....	20
8.105.2 Processing range of intended operation	20
8.105.3 Short circuit test	20
8.105.4 Electrode consumption	20

8.105.5	Tap-to-tap time	20
8.105.6	Power on time	20
8.105.7	Arcing time	20
8.105.8	Process time.....	20
8.105.9	Apparent power	20
8.105.10	Active power.....	20
8.105.11	Reactive power.....	21
8.105.12	Power factor	21
9	Efficiency of the installation	21
9.1	General.....	21
9.2	Specific energy consumption	21
9.3	Heating efficiency of arc furnace installation	21
9.4	Supply power usage efficiency	22
9.5	Energy transfer efficiency	22
Annex A	(informative) Energy efficiency assessment	23
Annex B	(informative) Visual display of energy efficiency related information.....	24
B.101	General.....	24
B.102	Sankey diagram of power balance – to be adapted to EAF route.....	24
B.103	Time resolved power usage diagram	25
Annex C	(informative) Estimating energy use.....	28
C.1	General.....	28
C.2	Minimum energy consumption.....	28
C.3	Holding power.....	29
C.4	Transfer losses and transfer efficiency.....	29
C.5	Examples.....	29
Annex D	(informative) Energy recoverability	30
Annex AA	(informative) Short circuit test procedures (dip test).....	31
AA.1	General.....	31
AA.1.1	EAF AC	31
AA.1.2	EAF DC	31
AA.2	High current system: resistance and reactance of EAF AC.....	31
AA.3	Impedances determined by short circuit test	31
AA.4	Test procedures for EAF AC	32
AA.5	Reactance asymmetry factor.....	36
AA.6	Uncertainties of the operational short circuit measurements.....	37
Bibliography		38
Figure B.101	– Sankey diagram of a 130 MVA EAF DC (see Bibliography, Kühn)	24
Figure B.102	– Example of a time resolved power usage diagram of EAF scrap melting	26
Figure AA.1	– Typical single line diagram for measuring electrical data of the high current system to determine the resistance and reactance values.....	33

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) IEC draws attention to the possibility that the implementation of this document may involve the use of (a) patent(s). IEC takes no position concerning the evidence, validity or applicability of any claimed patent rights in respect thereof. As of the date of publication of this document, IEC had not received notice of (a) patent(s), which may be required to implement this document. However, implementers are cautioned that this may not represent the latest information, which may be obtained from the patent database available at <https://patents.iec.ch>. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

IEC 60676 has been prepared by IEC technical committee 27: Industrial electroheating and electromagnetic processing. It is an International Standard.

This fourth edition cancels and replaces the third edition published in 2011. This edition constitutes a technical revision.

This edition includes the following significant technical changes with respect to the previous edition:

- a) The structure has been redrafted according to IEC 60398:2015.
- b) The scope has been redrafted.
- c) The terms/definitions, normative references and bibliography have been updated and completed.
- d) The test methods and content from IEC 60398:2015 have been confirmed, replaced, or complemented with regards to direct arc furnaces (EAF, LF).

- e) The annexes from IEC 60398:2015 have been confirmed, replaced, or complemented with regards to direct arc furnaces (EAF, LF).

The text of this International Standard is based on the following documents:

Draft	Report on voting
27/1181/FDIS	27/1184/RVD

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

The language used for the development of this International Standard is English.

This standard is to be read in conjunction with IEC 60398:2015. It supplements or replaces the corresponding clauses of IEC 60398:2015. Where the text indicates a "modification" of, "addition" to or a "replacement" of the relevant provision of IEC 60398:2015, these changes are made to the relevant text of IEC 60398:2015. Where no change is necessary, the words "This clause of IEC 60398:2015 is applicable" are used. When a particular subclause of IEC 60398:2015 is not mentioned in this standard, that subclause applies as far as it is reasonable. When a particular subclause of IEC 60398:2015 is not applicable, the word "Void" is used.

In this standard, the following print types are used:

- terms defined in Clause 3: **bold type**.

This document was drafted in accordance with ISO/IEC Directives, Part 2, and developed in accordance with ISO/IEC Directives, Part 1 and ISO/IEC Directives, IEC Supplement, available at www.iec.ch/members_experts/refdocs. The main document types developed by IEC are described in greater detail at www.iec.ch/publications.

The committee has decided that the contents of this document will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC website under webstore.iec.ch in the data related to the specific document. At this date, the document will be

- reconfirmed,
- withdrawn, or
- revised.

IMPORTANT – The "colour inside" logo on the cover page of this document indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this document using a colour printer.

INTRODUCTION

Direct electrical arc furnaces are very important applications for steel scrap melting, melting of direct reduced iron (DRI), hot bricked iron (HBI) or hot metal. While ladle furnaces are mainly used for providing the required quality and final adjustment of temperature of molten steel before sending to casting machine or to vacuum treatment stations.

The manufacturer of the installation or equipment usually fulfils the following requirements, which come from different sources and are quite often in this order of priorities:

- a) to enable the intended process and make the installation work properly;
- b) to be cost effective during design and manufacturing;
- c) to ensure that the equipment is safe to use in the sense of providing freedom from unacceptable risk of physical injury or damage to the health of the operator (safety in the narrower sense of ISO 12100:2010);
- d) to ensure that the equipment is safe to use in the sense of providing freedom from unacceptable risk of physical injury or damage to the health of people, or damage to property or the environment (adding other safety aims to item c), and in the much broader definition of safety according to ISO/IEC Guide 51);
- e) to prove that the equipment is cost effective to operate and uses sufficiently small amounts of energy, material and other resources.

It is usually part of the proprietary knowledge of the manufacturer or user of the equipment, to make it cost effective or enable intended processes with a benefit. IEC 60519-1 and IEC 60519-4 assist with achieving safety in the ISO 12100:2010 sense. The focus of this document is on basic requirements for measuring instrumentation and test methods concerned with energy and resource efficiency, performance of the intended process and assessing cost of ownership for installations and equipment.

This document presumes that the installation or equipment is operated and maintained only by personnel consisting of skilled or instructed persons.

INDUSTRIAL ELECTROHEATING EQUIPMENT – TEST METHODS FOR DIRECT ARC FURNACES

1 Scope

This clause of IEC 60398:2015 is replaced by the following.

Replacement:

This document specifies the basic test procedures, conditions and methods for establishing the main performance parameters and the main operational characteristics of furnaces for direct arc heating, forming arcs between the **electrode** and metal, such as electric arc furnaces using alternating current (**EAF AC**) or direct current (**EAF DC**), and ladle furnaces (LF), with rated power level above 500 kVA .

Measurements and tests that are solely used for the verification of safety requirements of equipment for direct electrical arc furnaces are outside the scope of this document and are covered by IEC 60519-1, IEC 60519-4 and ISO 13578.

This document is applicable for the commissioning, verification of design improvements or for energy related tasks with respect to energy use or energy efficiency, establishing of an energy baseline, and labelling. Some concepts from this document can directly be used as key performance indicators.

Detailed tests for specific types of electric arc furnace equipment and installations are beyond the scope of this document. This document is intended as general reference for all future test standards applicable to particular electric arc furnace equipment or installations.

This document includes the concept and material presented in IEC 60398 on energy efficiency dealing with the electrical and processing parts of the equipment, as well as the overall performance.

Test methods for some special equipment, e.g., semiconductor converters, are covered by IEC 60146-1-1 and **furnace transformers** are covered by IEC 60076 series.

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

2 Normative references

This clause of IEC 60398:2015 is replaced by the following.

Replacement:

The following documents are referred to in the text in such a way that some or all of their content constitutes requirements 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 60398:20215, *Installations for electroheating and electromagnetic processing – General performance test methods*

IEC 60519-1, *Safety in installations for electroheating and electromagnetic processing – Part 1: General requirements*

IEC 60519-4:2021, *Safety in installations for electroheating and electromagnetic processing – Part 4: Particular requirements for arc furnace installations*

ISO 13578, *Industrial furnaces, and associated processing equipment – Safety requirements for machinery and equipment for production of steel by electric arc furnaces*

3 Terms, definitions and abbreviated terms

3.1 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 60398:2015 and the following apply.

ISO and IEC maintain terminology databases for use in standardization at the following addresses:

- ISO Online browsing platform: available at <https://www.iso.org/obp>
- IEC Electropedia: available at <https://www.electropedia.org>

NOTE The terms and definitions refer to EAF and/or LF where applicable.

3.1.101

active power

P

under periodic conditions, mean value, taken over one period T of the instantaneous power p

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

Note 1 to entry: Under sinusoidal conditions, the active power is the real part of the complex power $\underline{S}$, thus $P = \text{Re}(\underline{S})$.

Note 2 to entry: The coherent SI unit for active power is Watt, W.

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

3.1.102

apparent power

S

power rating of the **furnace transformer**, energizing the EAF or LF (in MVA)

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

where

U is the voltage, RMS, sinusoidal value [in kV]

I is the current, RMS sinusoidal value [in kA]

[SOURCE: IEC 60050-131:2002, 131-11-41, modified – more precise]

3.1.103**arc furnace**

furnace with a vessel, in which metal or other charged conducting material is heated mainly by electric arc or joule effect using alternating current (AC) or direct current (DC)

[SOURCE: IEC 60050-841:2004, 841-26-05, modified – more precise]

3.1.104**arcing time**

actual current flow time during power-on time

Note 1 to entry: Arcing time represents a high percentage of power on time.

Note 2 to entry: It is expressed in minutes (min).

3.1.105**asymmetry factor**

K

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

3.1.106**arc furnace transformer**

transformer changing high voltage electrical power supply to a lower voltage and higher current for an arc furnace process

[SOURCE: IEC 60050-841:2004, 841-26-55, modified – more precise]

3.1.107**capacity**

<of EAF> quantity of liquid material, which can be produced in the EAF during one heat (in t)

Note 1 to entry: Whether metric or short tons according to pre-requisites.

3.1.108**cold state**

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

3.1.109**clean bus**

high voltage bus system which supplies the auxiliary equipment (e.g., motor control center, control system) where the network distortions are considered to be lower than in the dirty bus system

3.1.110**DC reactor**

<smoothing choke> inductor smoothing electrical high frequency fluctuations, due to changes in arc conditions

Note 1 to entry: In case multiple **rectifiers** are coupled in the system, inductors can decrease the fluctuations as well.

3.1.111**dirty bus**

high voltage bus system which supplies the **furnace transformer** and contains the network distortions from the process (e.g., flicker, harmonics)

Note 1 to entry: Distortion values on the dirty bus can exceed the limits of power quality of the grid.

3.1.112
disconnector
grounding switch

motor operated non load switch providing visible safety distance and connection to ground installed between the furnace switchgear and the furnace transformer

3.1.113
electric arc furnace using alternating current
EAF AC

furnace, in which electric arcs between the electrodes and conducting material are formed, using alternating current

[SOURCE: IEC 60050-841:2004, 841-26-07 modified – more precise]

3.1.114
electric arc furnace using direct current
EAF DC

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

[SOURCE: IEC 60050-841:2004, 841-26-06, modified – more precise]

3.1.115
EAF electrode
LF electrode

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

[SOURCE: IEC 60050-841:2004, 841-26-38, modified – more precise]

3.1.116
furnace shell

vessel of **arc furnace** made from metal (currently: steel) and covered by a roof

[SOURCE: IEC 60050-841:2004, 841-26-20, modified – more precise]

3.1.117
furnace switchgear

high-voltage switchgear connecting the **furnace transformer** to the electrical supply providing switching on/off under load

3.1.118
heat melt

liquid metal which is tapped after one process batch from an EAF into a ladle

Note 1 to entry: One heat produced during one process cycle.

3.1.119
high current system

assembly of conductors to carry the high current between **furnace transformer** secondary bushings and **electrode(s)**

Note 1 to entry: It consists of the bus bar system, cables and either a current tube system or current conducting **electrode** arm to the electrodes.

[SOURCE: IEC 60050-841:2004, 841-26-54, modified – more precise]

3.1.120**hot state**

<of EAF> thermal state of an EAF in which the lining temperature is above 600 °C and a steady-state temperature of the components is reached

3.1.121**operational short circuit**

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

Note 1 to entry: In **EAF DC**, short circuit is reached if the **electrode** from the top is in contact with the charge/liquid material.

[SOURCE: IEC 60050-841:2004, 841-26-70, modified – more precise]

3.1.122**phase rotation**

phase sequence of the electromagnetic field

3.1.123**power factor** λ

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

$$\lambda = \frac{P}{S}$$

where

P is the active power [in MW]

S is the apparent power [in MVA]

Note 1 to entry: $\cos \varphi$ contains only fundamental grid frequency, 50 / 60 Hz.

Note 2 to entry: λ contains the fundamental and harmonic frequencies.

3.1.124**power on time****time p-on**

time from first arcing till switching off the furnace circuit breaker per **heat**

Note 1 to entry: It is expressed in minutes (min).

3.1.125**process time**

actual time during of energy input (electrical, gas, oxygen, etc.)

Note 1 to entry: It is expressed in minutes (min).

3.1.126**production rate**

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

Note 1 to entry: It is expressed in t/h.

3.1.127
reactive power

Q

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

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (\text{for three-phase system})$$

[SOURCE: IEC 60050-131:2002, 131-11-44, modified – more precise]

3.1.128
rectifier

<of EAF> device by means of which alternating current is transferred into direct current

3.1.129
series reactor

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

3.1.130
specific electrical energy consumption

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

Note 1 to entry: It is expressed in kWh/t.

[SOURCE: IEC 60050-841:2004, 841-22-72, modified – more precise]

3.1.131
tap to tap time

t_{tt}

time between end of tapping of previous heat and end of tapping of actual heat

Note 1 to entry: It is expressed in minutes (min).

3.2 Abbreviated terms

AC	Alternating current
CT	Current transformer
DC	Direct current
DRI	Direct reduced iron
EAF	Electric arc furnace
HBI	Hot briquetted iron
LF	Ladle furnace
LPG	Liquid petrol gas
PT	Potential transformer
SAF	Submerged arc furnace
SVC	Static VAr compensation

4 Basic provisions for testing and test conditions

4.1 Aim of testing

This subclause of IEC 60398:2015 is applicable.

4.2 Communication of test results

This subclause of IEC 60398:2015 is applicable with the following additions.

Addition:

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

4.3 Boundaries of the energy using system for testing

4.3.1 General considerations

This subclause of IEC 60398:2015 is applicable with the following additions.

Addition:

- e) Energy used for gas cleaning systems shall be included in the calculation of used and lost energy.

4.3.2 Batch type installations

This subclause of IEC 60398:2015 is not applicable and replaced by the following.

Replacement:

EAF installations typically operate in batch mode. The typical process can be described as follows:

- a) Charging of scrap, etc., in one batch / basket at the beginning of the heat.
- b) Melt down and charging of next batch / basket incl. scrap, direct reduced iron (DRI), hot briquetted iron (HBI) or hot metal steel. DRI or HBI may be charged continuously until the full charging weight will be reached.
- c) If only scrap is used as a raw material several more batches / baskets are necessary to reach the final charging weight.
- d) Overheating and start of deslagging: Heating up the molten material until tapping temperature and start of deslagging.
- e) Refining: Alloys can be charged to reach desired qualities. In some applications the refining will be done in Ladle Furnace (LF).
- f) Tapping of molten material into a ladle.
- g) Tapping of residual slag into the slag pit / slag pot.

In some applications burners may be used after charging the batches / baskets. Foamy slag (addition of lime, carbon and oxygen) is used during overheating and refining to protect the lining and to increase electrical power input.

4.3.3 Continuous type installations

This subclause of IEC 60398:2015 is not applicable and replaced by the following.

Replacement:

EAF continuous or semi-continuous process are not common.

4.4 General requirements for testing

This subclause of IEC 60398:2015 is applicable with the following replacement:

Replacement:

The relevant safety requirements of IEC 60519-4 and the manufacturer's instructions shall be observed during all tests, to ensure safety.

The **furnace transformer/series reactor** design shall offer at least one combination to enable the dip test (see Annex AA).

The characteristics and parameters defined in Clause 8 shall be tested in the **hot state of EAF** or LF installation:

- a) during commissioning,
- b) when the installation is ready for normal operation,
- c) at regular intervals as specified by the manufacturer,
- d) following maintenance or
- e) after modifications.

The operator responsible for performing the measurements or tests shall be sufficiently trained to make accurate tests and have enough time and resources at hand to perform measurements and tests as intended and indicated in this document.

4.5 Operating conditions during tests

This subclause of IEC 60398:2015 is applicable with the following addition.

Addition:

The pre-conditions given by the manufacturer shall be fulfilled.

4.6 Environmental conditions during tests

This subclause of IEC 60398:2015 is applicable.

4.7 Supply voltage

This subclause of IEC 60398:2015 is applicable with the following addition.

Addition:

Voltage fluctuations and minimum fault level of incoming power supply line shall be agreed between the supplier and user.

Tests shall be performed independently of the status of the compensation equipment (e.g. SVC, Statcom, filter). Use or non-use of the compensation equipment shall be reported in the test report.

NOTE Testing of EAF with use of compensation equipment and without use of compensation equipment will provide information of the grid (short circuit power/fault level).

5 Comparing equipment or installations

Void.

6 Measurements and charged material

6.1 General

This clause of IEC 60398:2015 is applicable with the following addition.

Addition:

Type, number and quality of measurements and charged material need to be pre-defined by the end user and the manufacturer in advance.

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

6.2 Time resolution

This subclause of IEC 60398:2015 is applicable.

6.3 Frequency measurement

Void.

6.4 Measurement of electrical data

6.4.1 Supply voltage and current

This subclause of IEC 60398:2015 is applicable with the modified headline.

6.4.2 Voltage, current, electrical power and resistance

This subclause of IEC 60398:2015 is applicable with the following replacement:

Replacement:

Voltage and current transformers shall be divided in 2 groups: Measurement and protection. Measurement transformers are highly accurate but have a very limited overload capability (typical 10 % to 20 %). Protection transformers usually have an accuracy of 10 %, but can be overloaded highly (typically 10 times).

NOTE 1 For requirements of measurement transformers, see IEC 61869 series and IEC 60044 series.

The accuracy of equipment for voltage, current, power and energy measurements in the mains frequency and lower range shall be of class 1,0 or better not only for high power factor values $\geq 0,7$ but also for power factor below 0,3 unless otherwise specified.

The electronic unit calculating the RMS value shall not significantly decrease the accuracy of the fed voltage and current signals.

Equipment for active power measurement shall use a four-point probe, if applicable; the used probe type shall be part of the test report.

NOTE 2 Refer to Figure AA.1.

6.4.3 Measurement positions

This subclause of IEC 60398:2015 is applicable with the following addition:

Addition:

Location of voltage measurement shall be the feeding point of the primary voltage prior to the **series reactor / furnace transformer** location (see Figure AA.1), if not otherwise agreed between manufacturer and end user.

Any cable connection between substation and **furnace switchgear** shall not be included in the measurement.

6.5 Temperature measurement

This subclause of IEC 60398:2015 is applicable with the following addition:

Addition:

6.5.101 Dipping probes for liquid steel or slag

The temperature of slag and hot metal is measured discontinuously depending on the progress of the heat.

Latest developments show the use of glass fibre or other techniques for temperature measurement in **arc furnaces**.

The relative measurement error for all temperature measurements in compliance with this document shall be included in the test report.

6.6 Measurement of pressure, humidity or composition of fluids

This subclause of IEC 60398:2015 is applicable.

6.7 Charged material

This subclause of IEC 60398:2015 is not applicable and is replaced as follows:

Replacement:

The EAF will be charged with one or more of the following materials depending on available raw materials and targeted products:

- a) scrap,
- b) DRI (direct reduced iron) or HBI (hot briquetted iron),
- c) liquid pig iron or returned material from ladle furnace.

The above mentioned materials may be mixed, and the order may be defined according to energy input optimization (reduction of thermal losses) and power on time optimization.

The electrical power input is supported by other energy carriers, e.g.:

- d) natural gas, LPG (liquid petroleum gas) or other gases which will be developed under the aspect of CO₂ reduction, used for burners,
- e) oxygen needed for burners as well as for the chemical reaction in the heat,
- f) carbon if required by the process.

Number and installed power of the burners to be designed by the **arc furnace** manufacturer.

The lining needs to be protected by:

- g) right choice of lining material,
- h) foaming slag operation (adding of lime, carbon, and oxygen), where possible,
- i) well-chosen power profile.

Raw materials and alloys are charged depending on the required target product (quality of steel).

Highly alloys steel grades (e.g., Cr, Mn, etc.) require significant quantities of alloys and therefore charged at the beginning of the heat. Lower amounts of alloys may be charged at the end of the heat into the EAF or LF, depending on the sample analysis.

7 Numerical modelling

This clause of IEC 60398:2015 is not applicable and is replaced by the following.

Replacement:

Numerical calculations may be used, if measurements are not possible due to lack of accessibility, being too complex, being too costly or measuring equipment is not available. A vast number of available mathematical solutions exists depending on the actual topic to be tackled. Guidance for the use of specific methods is beyond the scope of this document, but general minimum requirements for the performance of numerical tests may be given.

The accuracy of the calculation shall be comparable to achievable accuracy of measurements. Required results define the needed accuracy of the implemented geometrical setup and numerical effort like grid resolution or iterative cycles.

The use of calculated data instead of measurements shall be clearly stated. The documentation of the calculation shall include:

- a) the numerical method used,
- b) the geometrical setup used,
- c) all relevant modelling data,
- d) a description of the models used relevant to the calculation,
- e) the software and version used,
- f) any set parameter of the software that influences the result,
- g) the method used for verification of the used models and the calculation itself.

NOTE Above specified documents/data are not necessarily part of user documentation.

8 Technical tests

This clause of IEC 60398:2015 is not applicable and is replaced by the following.

Replacement:

8.101 General

In all cases the definition of the boundaries of the energy using system given in 4.3 applies and great care in using the boundaries shall be observed. All relevant data shall be measured or calculated and recorded.

Generally cold function tests, cold commissioning and hot commissioning shall be defined between and performed by the manufacturer and the end user.

8.102 Electrical insulation

For insulation measurements refer to IEC 60519-4:2021.

8.103 Cold function test

Precondition is that all involved parties concerned with erection works and installations have confirmed the readiness of the installation for cold function test (e.g., end of erection protocol)

The cold function test of installations is carried out as follows:

- a) in a **cold state of EAF**,
- b) the installation is ready to be operated without a charged material including phase rotation test,
- c) for the safety validation see IEC 60519-4,
- d) at least the results of the cold function tests shall be documented.

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-clockwise seen from the top of the arc furnace. Improper phase rotation loosens the electrode nipping and thus could initiate electrode breakage.

8.104 Hot commissioning

8.104.1 General

Hot commissioning means heating of the **furnace shell and electrodes** to arrive at a state as close as reasonable to hot standby operation is carried out, if applicable.

8.104.2 Energy consumption during holding operation

In certain cases, it would be necessary to keep the temperature of the liquid steel inside the vessel in a constant range (e.g., malfunctions in the following processes).

The total energy consumption during holding and the holding time is measured over a sufficiently long time allowing for averaging.

8.104.3 Energy consumption during normal operation

All measurements of the electric energy consumption shall reflect specific consumption by defined parts of the installation during a defined time period or a specified operation. The following shall be reported, if applicable:

- a) The energy consumption of a batch type installation during one complete heat; this may be measured and averaged over a defined number of heats. The number of heats and variation of energy consumption shall be recorded in the measurement report.
- b) The energy of a continuously operating installation during processing of a defined amount of charged material where the installation has reached a stationary state.
- c) The energy consumption of the installation over a complete production cycle – for example, during a workday or one week.

8.104.4 Rated arc furnace capacity

Conditions: **furnace shell**, refractory lining shall be in hot state. Charged material (metallic and additives) and proceedings (melt down, overheating, deslagging, tapping, etc.) shall be according to supplier's recommendations. The heat is tapped after reaching final composition and temperature.

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

The amount of tapped liquid metal can be measured or calculated, e.g.:

- a) Using the charged weight including corrections (e.g., slag, dust, etc.).
- b) Measurement of tapped liquid metal (e.g., weighing system in ladle car or crane, etc.).
- c) Using the weights of downstream products corrected for any further production steps (e.g., ladle furnace, additives, etc.).

The net production rate considering only the weight of processed heats and of intended quality shall be stated for a single batch process or for a defined time period. This is normally measured e.g., heats per day, tons per heat, etc.

8.105 Preparation for performance test

Manufacturer and user shall define and agree the pre-conditions of the final acceptance test in an early stage, e.g.:

- a) raw material quality and humidity (water or ice content),
- b) scrap density, maximum size of single scrap lump,
- c) number of scrap buckets / batches per heat (one bucket / batch or more bucket / batches),
- d) required steel grade(s),
- e) tapping temperature,
- f) tap-to-tap time,
- g) power on time,
- h) electrical energy input (kWh/t),
- i) other energy input (kWh/t),
- j) **electrode** quality,
- k) **electrode** consumption.

The composition and content of the charged material shall consist of the same materials as used for intended production.

The performance test specification and test procedure as well as the parameters and criteria used for performance evaluation shall be stated in the test report.

8.105.1 Performance dependence on supply voltage

The actual supply voltage and its variation shall be within the contractual agreed range.

8.105.2 Processing range of intended operation

The processing range and intended operation shall be agreed between manufacturer and the user in advance. The range of intended use shall not be exceeded.

8.105.3 Short circuit test

The resistance and reactance of the **high current system** shall be determined by a short circuit test. The short circuit test procedure is defined in Annex AA.

8.105.4 Electrode consumption

Electrode consumption per mass of tapped liquid metal (in kg/t) is measured during a contractual predefined number of 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.

$$g_{el} = \frac{G_{el}}{G}$$

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].

8.105.5 Tap-to-tap time

The **tap-to-tap time** shall be measured, e.g. by using the control system signals.

8.105.6 Power on time

The **power on time** shall be measured, e.g., by using the control system signals.

8.105.7 Arcing time

The **arcing time** shall be measured, e.g., by using the control system signals.

8.105.8 Process time

The **process time** shall be measured if applicable by using the control system signals (e.g., double **furnace shell**, etc.).

8.105.9 Apparent power

The **apparent power** shall be measured.

8.105.10 Active power

The **active power** shall be measured.

8.105.11 Reactive power

The **reactive power** shall be calculated using current and voltage measurements.

8.105.12 Power factor

The **power factor** shall be calculated or measured directly.

9 Efficiency of the installation

9.1 General

This subclause of IEC 60398:2015 is applicable with the following addition.

Addition:

The efficiency of the **arc furnace** installation shall be divided between the load of the main process equipment connected to the **dirty bus** (e.g., **furnace transformer**) and the auxiliary equipment connected to the **clean bus** (e.g., control system, low voltage motors).

The specified values of the energy consumption need to be agreed between manufacturer and user. At the present time the energy efficiency only refers to the **furnace transformer** connected to the dirty bus.

9.2 Specific energy consumption

This subclause of IEC 60398:2015 is applicable with the following replacement:

Replacement:

The energy consumed for processing the charged material per amount of charged material is calculated using the energy consumption of the main process equipment including start-up, holding, hot standby and shut-down energy consumption. This is the average total energy consumption of the main process equipment divided by the amount of charged material of intended quality made during time of measurement. It is energy consumption per weight unit.

The calculation shall be made based on data from the applicable tests defined in 8.105.1 to 8.105.12. The reported value shall include the time base of the test.

9.3 Heating efficiency of arc furnace installation

This subclause of IEC 60398:2015 is not applicable and is replaced by the following (with modified headline).

Replacement:

The heating efficiency is calculated using the following formula:

$$\eta_{\text{furnace}} = E_{\text{min}} / E_{\text{furnace}}$$

where

η_{furnace} is the heating efficiency of the main process equipment of the arc furnace installation;

E_{min} is the theoretical minimum specific energy consumption as defined in Annex C the minimum theoretically needed energy;

E_{furnace} is the specific energy consumption of the main process equipment of the arc furnace installation.

9.4 Supply power usage efficiency

Void.

9.5 Energy transfer efficiency

This subclause of IEC 60398:2015 is applicable with the following replacement

Replacement:

The estimation of the efficiency of energy transfer to the charged material is typically a complex task. Test methods concerning the efficiency of transfer from the installation to the charged material are given in Annex C.

The efficiency of energy transfer from the installation to the charged material during processing is influenced by various particular features of the installation and the charged material, such as the following:

- a) the size and composition of the charged material which can change during the processing;
- b) the convective transport of heat inside the installation and out of the installation – this includes intentional cooling of parts of the installation;
- c) losses through heat conduction from the charged material or from the installation to the outside.

The provisions on test conditions according to 4.5 shall apply. Particular care shall be taken to monitor the test conditions and effects that can influence the outcome of the test.

Whereas different categories of installations are intended for many different processes, only some of these processes allow the exact measurement of energy transferred to a charged material. Many process parameters are hard to capture during processing:

- d) heat energy stored in the charged material can be calculated from the temperature rise of the charged material, if its mass and the specific heat $c_p(T)$ are known;
- e) the evaporation energy can be estimated, if temperature, evaporated mass, specific heat, and enthalpy of evaporation of the evaporating solvent are known;
- f) the energy needed for chemical reactions can be estimated if the mass of charged material undergoing a chemical reaction is known, as well as the energy needed for the reaction.

Tests employing the intended charged material can give reasonably exact results.

Annex A
(informative)

Energy efficiency assessment

This Annex of IEC 60398:2015 is applicable.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60676:2024

Annex B (informative)

Visual display of energy efficiency related information

This Annex of IEC 60398:2015 is replaced with the following:

Replacement:

B.101 General

This Annex B discusses the graphical display of energy efficiency related information, as quite often efficiency information given as a single number is not sufficient to start assessment of possible measures to decrease energy use. ISO 13579-1 provides further material.

Such information is usually generated during commissioning or even later during normal operation over long time frame.

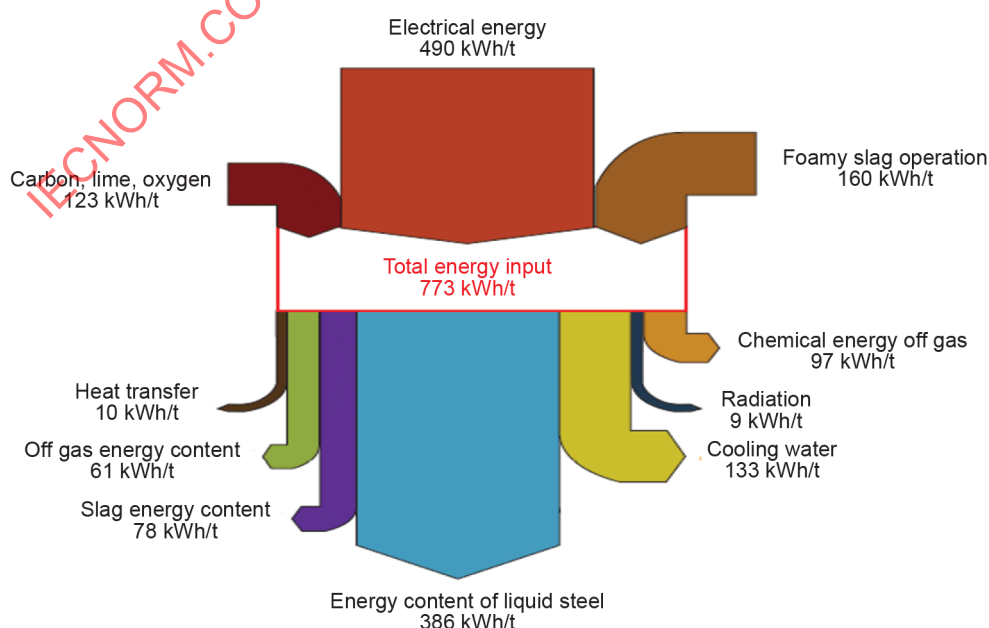
B.102 Sankey diagram of power balance – to be adapted to EAF route

A Sankey diagram of power usage and balance is a simple and very powerful way to display energy use, energy losses and to illustrate major sources of loss.

All energy input is considered in order to create a useful power balance diagram:

- the **specific electrical energy consumption** at the connection of the installation to the mains,
- all non-electrical energy as fuel enthalpy starting from a storage on the premises of the plant,
- the cooling water loss shown in Figure B.101 includes the losses of **furnace transformer, series reactor**, water cooled parts where applicable.

Figure B.101 shows an example of a Sankey diagram of a 130 MVA **EAF DC**.



IEC

Figure B.101 – Sankey diagram of a 130 MVA EAF DC (see Bibliography, Kühn)

B.103 Time resolved power usage diagram

If an installation performing some different tasks for a process or energy use is not only dominated by the process itself, a Sankey diagram cannot reflect all relevant aspects. In this case a second approach, i.e., making use of a time resolved energy usage diagram is suggested; Figure B.102 provides an example of an EAF for scrap melting.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60676:2024

Example:

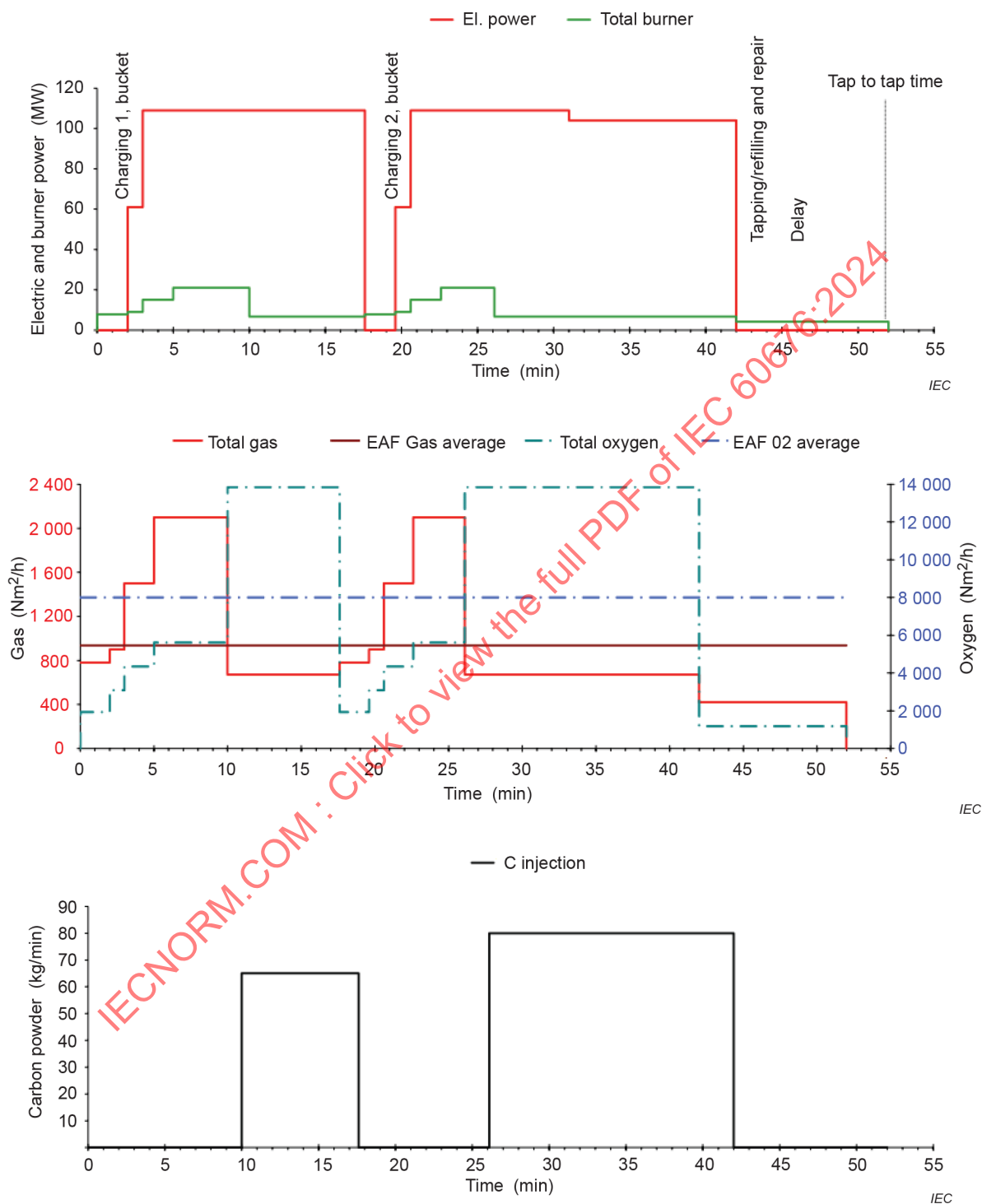


Figure B.102 – Example of a time resolved power usage diagram of EAF scrap melting

Figure B.102 shows one **heat** of an **EAF** operation in a **hot state**. The display of actual time resolved power usage data is definitively not creating maximum values.

In addition, the following considerations are recommended:

- a) if the installation cools down between cycles, the time resolved power usage diagram shall be adapted,
- b) the different operations are displayed in a logical order on the time axis over the time they are performed on average,
- c) **processing time** can further be differentiated between average time necessary for products in intended quality,
- d) **tap to tap time** and **arcing time** shall be identifiable.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60676:2024

Annex C (informative)

Estimating energy use

C.1 General

This clause of IEC 60398:2015 is applicable with the following replacement.

Replacement:

The energy used for a specific process depends on the energy necessary for the intended enthalpy increase in the charged material; the minimum required power further depends on the defined processing time. The theoretical minimum specific energy consumption can usually be calculated (Clause C.2). It is a relevant concept for energy efficiency analysis, as it provides a theoretical limit for any improvements and is a benchmark for the actual specific energy consumption of the installation (9.2).

The actual power necessary for a process and thus the minimum installed power in an installation depends on the following factors:

- the minimum theoretical power necessary for the process,
- the energy transfer efficiency to the charged material,
- the energy conversion efficiency of the installation,
- other losses inside the installation.

C.2 Minimum energy consumption

This clause of IEC 60398:2015 is applicable with the following replacement:

Replacement:

The theoretical minimum specific energy consumption (per mass unit) is defined by the increase of the enthalpy between incoming charged material (in) and outgoing charged material (out).

$$E_{\min} = E_{\text{out}} - E_{\text{in}} = \dot{m} \cdot (c_p(T) \cdot \Delta T + p \cdot \Delta v + \Delta h_{\text{pc}} + r) \quad (\text{C.1})$$

NOTE Only the first part of the formula, $E_{\min} = \dot{m} \cdot c_p(T) \cdot \Delta T$, is relevant for arc furnace installations.

where

- $E_{\min}$ is the theoretical minimum specific energy consumption,
- E_{out} is the energy of the charged material leaving the process;
- E_{in} is the energy of the charged material entering the process;
- $\dot{m}$ is the mass of the charged material (assuming no strong change of charged material mass);
- $c_p(T)$ is the specific heat of the charged material;
- ΔT is the temperature change from ambient to maximum process temperature;
- p is the ambient pressure (assuming that the process starts and ends at ambient);

- Δv is the change of the specific volume of the charged material (relevant only for gases);
- Δh_{pc} is the specific enthalpy of phase change (such as melting or evaporation of solvents) during the process;
- r is the specific energy needed for intended chemical reactions to occur.

Formula (C.1) is for calculating the minimum energy needed to perform the intended process, when no energy is lost, and no energy is reused or recycled in the installation.

The theoretical minimum specific energy consumption of the liquid metal undergoing the intended process depends on the following:

- a) the actual temperature of the metal prior to the process (e.g., scrap, hot metal, pig iron);
- b) the state of the metal prior to the process;
- c) the minimum requirement chemical reactions of the metal to perform the intended process.

C.3 Holding power

Void.

C.4 Transfer losses and transfer efficiency

This clause of IEC 60398:2015 is applicable with the following replacement.

Replacement:

The efficiency of energy transfer to the charged material is independent from the earlier considerations. It is governed by:

- a) conversion losses of energy from one form of energy to another,
- b) transfer losses of energy from one device to the next,
- c) energy not absorbed but reflected or transmitted by the charged material or absorbed during transfer from the source to the charged material by other parts of the installation.

Typical examples are:

- losses during current or voltage conversion in transformers;
- losses in semiconductor converters and rectifiers, if applicable;
- losses in high current system;
- radiation or fields absorbed by the installation (e.g., walls, structural parts).

C.5 Examples

Void.

Annex D
(informative)

Energy recoverability

This Annex of IEC 60398:2015 is applicable with the following addition.

Addition:

An example of EAF energy recovery is scrap preheating or steam production from off-gas.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60676:2024

Annex AA (informative)

Short circuit test procedures (dip test)

AA.1 General

AA.1.1 EAF AC

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 **operational short circuit**. Values are converted to the **high current system** on the transformer secondary side according to transformer ratio and vector group.

For **furnace 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).

AA.1.2 EAF DC

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

AA.2 High current system: resistance and reactance of EAF AC

Resistance (R) and reactance (X) values of the **high current system** are determined by means of three consecutive single-phase short circuits (one of three circuit loops at a time leads current), i.e. by consecutively dipping electrodes A+B, B+C and C+A into the liquid steel bath shortly before tapping. A three-phase short circuit with **electrodes** A+B+C dipped at the same time is not suitable for determination of the single-phase impedances of the system. In this case the average impedance is determined. A measurement on the secondary side of the **furnace transformer** is generally not suitable because it is corrupted by induction into the voltage measuring loops (accuracy of results not sufficient). The induced fault voltages are highest during short circuit conditions.

AA.3 Impedances determined by short circuit test

Almost all **furnace transformers** are delta connected on the secondary side in order to keep the currents in the windings low. In case of a secondary delta connection two different transformer configurations exist that influence the short circuit test result.

Internal delta closure Dd0 (delta connection inside transformer):

The three impedances determined are the phase impedances of the **high current system** (transformer tubes/bars, cables, arms, **electrodes**).

External delta closure Diii0 (delta connection outside of **furnace transformer**):

The three impedances determined are a combination of secondary external delta impedances and phase impedances of the **high current system** (secondary delta tubes/bars, cables, arms, electrodes).

NOTE In case of a star connected **furnace transformer** (Yy0) the phase impedances of the **high current system** are determined.

AA.4 Test procedures for EAF AC

Prior to the tests the **furnace transformer** is switched to a suitably low voltage tap and a **series reactor** (if installed) is set to a suitably high reactance tap.

The **operational short circuit** currents shall not exceed the rated secondary transformer current in order to protect the electrical equipment.

Prior to the test the three electrodes are adapted to equal length below the holder to guarantee that the three **electrode** arms are in designed position during the tests.

Prior to dipping the electrodes into the steel bath, the **furnace transformer** needs to be switched ON to enable a smooth rise of the **electrode** currents up to the **operational short circuit** values.

During the tests the **operational short circuit** currents need to be steady. This condition is reached if the electrodes are dipped into the steel bath (not only into a slag layer). The power factor then reaches values below 0,25 inductive. The dipping lasts about 10 seconds with steady currents.

During the tests any other actions need to be avoided (e.g., chemical energy input, charging of any materials). The **electrode** leading no current needs to be raised so high that any occasional contact with slag will certainly be avoided.

The measurement equipment is connected to the **furnace switchgear** (primary side) metering, i.e., the primary current transformers (CT) and the primary voltage transformers (PT) which are installed close to the furnace. According to 6.4.2 PT and CT shall have accuracy class 1,0 or better, if not specified otherwise. In case that a **series reactor** is not included in the measurement, its resistance and reactance do not need to be subtracted in the evaluation. However, prior to the test the **series reactor** shall be set to a suitable high reactance tap to limit the currents.

The allocation of the primary phases (L1, L2, L3) and the electrodes (A, B, C) needs to be determined before the tests. This can be tested by rising one **electrode** after the other in refining stage of a prior heat. If the **furnace transformer** vector group number is other than 0 then the currents can be measured via matching CT (typically installed at the **furnace transformer**) to account for the shift from secondary to primary side. The measurement recorder used shall be class A.

Figure AA.1 shows a typical single line diagram for measuring electrical data of the **high current system**.

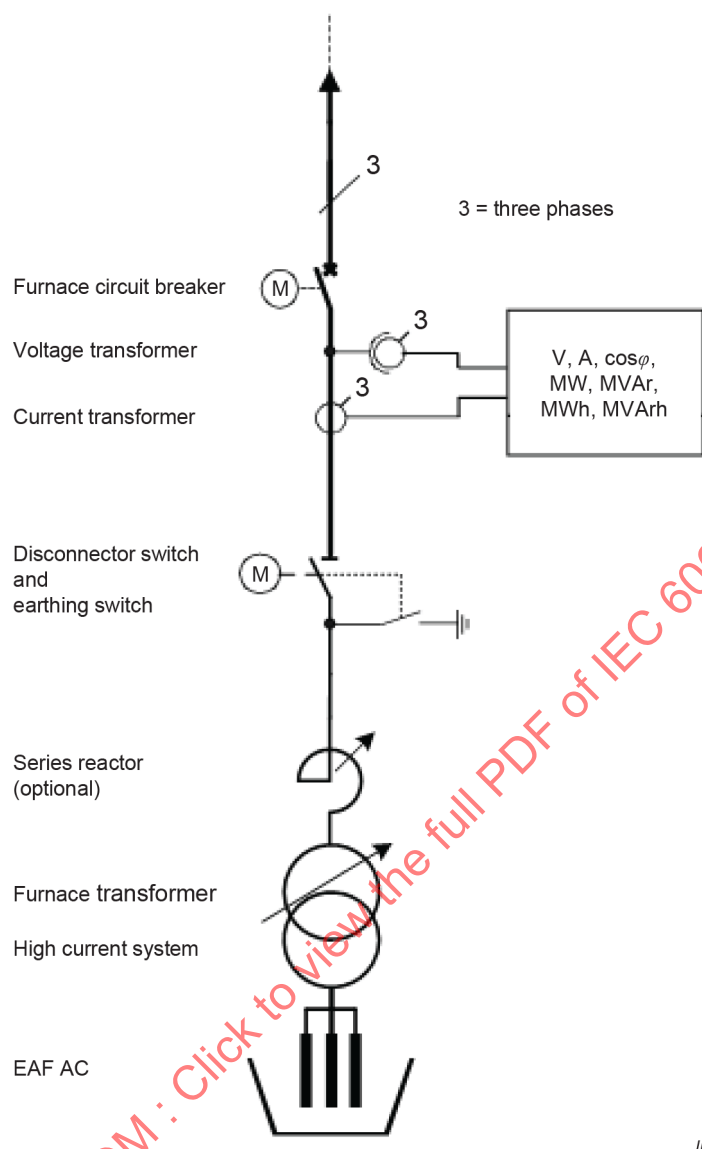


Figure AA.1 – Typical single line diagram for measuring electrical data of the high current system to determine the resistance and reactance values

Measured primary values (index 1):

I_{1A}, I_{1B}, I_{1C}	line currents (in A);
$U_{1A0}, U_{1B0}, U_{1C0}$	phase-star point voltages (in V);
$U_{1AB}, U_{1BC}, U_{1CA}$	phase-phase voltages (in V);
ΣP	total active power (in W).

The total active power which is required for the evaluation can be determined as the sum of phase-star point active powers which involves the phase-star point voltages:

$$\Sigma P = P_{1A0} + P_{1B0} + P_{1C0}$$

or alternatively as the "Aron" active power which involves the phase-phase voltages:

$$\Sigma P = P_{1AB} + P_{1CB}$$

Here the reference conductor used for the "Aron" power is "B" but it can be arbitrarily chosen.

Evaluation of resistances, reactances and impedances of the **high current system**.

Resistances, impedances and reactances (in Ω) for **electrode A** and B dipped (C raised):

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

Resistances, impedances, and reactances (in Ω) for **electrode B** and C dipped (A raised):

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

Resistances, impedances, and reactances (in Ω) for **electrode C** and A dipped (B raised):

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

Calculation of the individual phase values (in Ω):

$$R_{1A} = \frac{R_{1AB} + R_{1CA} - R_{1BC}}{2} \quad R_{1B} = \frac{R_{1AB} + R_{1BC} - R_{1CA}}{2} \quad R_{1C} = \frac{R_{1BC} + R_{1CA} - R_{1AB}}{2}$$

$$X_{1A} = \frac{X_{1AB} + X_{1CA} - X_{1BC}}{2} \quad X_{1B} = \frac{X_{1AB} + X_{1BC} - X_{1CA}}{2} \quad X_{1C} = \frac{X_{1BC} + X_{1CA} - X_{1AB}}{2}$$

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

Furnace transformer voltage ratio, secondary resistance and reactance (in m Ω , index 2) for the tap set:

$$k_T = \frac{U_{1T}}{U_{2T}}$$

$$R_{2TA} \approx R_{2TB} \approx R_{2TC} \approx R_{2Tm} = \frac{P_{CuT}}{3 \cdot I_{2T}^2}$$

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

Series reactor secondary resistance and reactance (in mΩ) for the tap set:

$$R_{2RA} \approx R_{2RB} \approx R_{2RC} \approx R_{2Rm} = \frac{P_{CuR}}{3 \cdot I_{1R}^2 \cdot k_T^2}$$

$$X_{2RA} \approx X_{2RB} \approx X_{2RC} \approx X_{2Rm} = \frac{X_{R-Tap}}{k_T^2}$$

High current system impedances for vector group number 0 (in mΩ, index 2):

$$\begin{aligned} R_A &\approx \frac{R_{1A}}{k_T^2} - R_{2Tm} - R_{2Rm} & R_B &\approx \frac{R_{1B}}{k_T^2} - R_{2Tm} - R_{2Rm} & R_C &\approx \frac{R_{1C}}{k_T^2} - R_{2Tm} - R_{2Rm} \\ X_A &\approx \frac{X_{1A}}{k_T^2} - X_{2Tm} - X_{2Rm} & X_B &\approx \frac{X_{1B}}{k_T^2} - X_{2Tm} - X_{2Rm} & X_C &\approx \frac{X_{1C}}{k_T^2} - X_{2Tm} - X_{2Rm} \\ Z_A &= \sqrt{R_A^2 + X_A^2} & Z_B &= \sqrt{R_B^2 + X_B^2} & Z_C &= \sqrt{R_C^2 + X_C^2} \end{aligned}$$

Mean values of resistance R_m and reactance X_m are the arithmetic averages of the individual phase values.

Designations:

I_{1A}, I_{1B}, I_{1C}	primary line currents
$U_{1AB}, U_{1BC}, U_{1CA}$	primary phase-phase voltages
P_{1AB}, P_{1CB}	primary loop active powers
$U_{1A0}, U_{1B0}, U_{1C0}$	primary phase-star point voltages
$P_{1A0}, P_{1B0}, P_{1C0}$	primary star point active powers
R_{1A}, R_{1B}, R_{1C}	primary phase resistances
X_{1A}, X_{1B}, X_{1C}	primary phase reactance's
Z_{1A}, Z_{1B}, Z_{1C}	primary phase impedances
k_T	voltage ratio of the furnace transformer for the tap of the test
P_{CuT}	furnace transformer load losses for the tap of the test
U_{1T}	furnace transformer rated primary voltage
U_{2T}	furnace transformer rated secondary voltage for the tap of the test
I_{2T}	furnace transformer rated current for the tap of the test
S_T	furnace transformer rated power for the tap of the test
u_{kT}	furnace transformer rated percentage impedance voltage for the tap of the test
$R_{2TA}, R_{2TB}, R_{2TC}$	furnace transformer secondary phase resistances
R_{2Tm}	furnace transformer secondary mean resistance

$X_{2TA}, X_{2TB}, X_{2TC}$	furnace transformer secondary phase reactances
X_{2Tm}	furnace transformer secondary mean reactance
P_{CuR}	series reactor load losses for the tap of the test
X_{R-Tap}	series reactor reactance for the tap of the test
I_{1R}	series reactor rated current
$R_{2RA}, R_{2RB}, R_{2RC}$	series reactor secondary phase resistances
R_{2Rm}	series reactor secondary mean resistance
$X_{2RA}, X_{2RB}, X_{2RC}$	series reactor secondary phase reactances
X_{2Rm}	series reactor secondary mean reactance
R_A, R_B, R_C	resistance per phase
X_A, X_B, X_C	reactance per phase
Z_A, Z_B, Z_C	impedance per phase

AA.5 Reactance asymmetry factor

The electrical behaviour of any EAF is dominated by the reactance's of the system. Therefore, the reactance asymmetry of the **high current system** is the indicator for undesired system asymmetry. The **asymmetry factor** is defined by the phase reactance's X_A, X_B, X_C as follows:

$$K_{as-X} = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{X_m} \cdot 100\%$$

$X_{\max}$ is the largest, $X_{\min}$ the smallest and X_m the arithmetic average of the three-phase reactances.

A good reactance asymmetry of a **high current system** is a value below 4 %. The maximal asymmetry of a completely coplanar system (cables, arms) is about 60 %. The resistances of the system are dominated by the electrodes because these have a very low conductance compared to copper or aluminium.

AA.6 Uncertainties of the operational short circuit measurements

Uncertainties resulting from the measurement equipment:

- Voltage transformers (PT) with class 1,0 or better typical errors (amplitude, phase): $\pm 0,5\%$ to $\pm 1\%$, $20''$ to $40''$ ($0,33^\circ$ to $0,67^\circ$).
- Current transformers (CT) with class 1,0 or better typical errors (amplitude, phase): $\pm 0,5\%$ to $\pm 1\%$, $30''$ to $60''$ ($0,5^\circ$ to $1,0^\circ$).
- Measurement recorder (Class A):
Voltage error (amplitude, phase): approximately $\pm 0,1\%$, $0,15^\circ$.
- Current error with current clamps (amplitude, phase): approximately $\pm 1\%$, 3° .

NOTE Uncertainties resulting from the configuration of the **high current system**. The conduction of the short circuit tests requires three different geometric configurations of the **high current system** (always one phase raised). The determined reactances X_A , X_B , X_C that depend on the geometry, are not equal to the real ones of the single design configuration (all three arms levelled at one time). The short circuit test measurement results are therefore not exact, but the best approximation achievable in praxis. Deviations between measured and real reactance values per phase are in a range of $\pm 1,5\%$ plus measurement equipment errors. The asymmetry calculated from these values has an error range of up to 10% .

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60676:2024

Bibliography

The Bibliography of IEC 60398:2015 is applicable with the following addition.

Addition:

IEC 60044 (all parts), *Instrument transformers*

IEC 60050-131:2002, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 131: Circuit theory*
IEC 60050-131:2002/AMD1:2008
IEC 60050-131:2002/AMD2:2013
IEC 60050-131:2002/AMD3:2019
IEC 60050-131:2002/AMD4:2021
IEC 60050-131:2002/AMD5:2021

IEC 60050-841:2004, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 841: Industrial electroheat*
IEC 60050-841:2004/AMD1:2021

IEC 60076 (all parts), *Power transformers*

IEC 60146-1-1, *Semiconductor converters – General requirements and line commutated converters – Part 1-1: Specification of basic requirements*

IEC 60683:2011, *Industrial electroheating equipment – Test methods for submerged-arc furnaces*

IEC 61869 (all parts), *Instrument transformers*

Kühn, R., *Untersuchungen zum Energieeinsatz in einem Gleichstromlichtbogenofen zur Stahlerzeugung*, Diss. Technische Universität Clausthal, 2002, Shaker Verlag (figure reproduced with kind permission of Shaker Verlag)

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60676:2024

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	42
INTRODUCTION.....	44
1 Domaine d'application	45
2 Références normatives	45
3 Termes, définitions et abréviations	46
3.1 Termes et définitions	46
3.2 Abréviations.....	51
4 Dispositions fondamentales relatives aux essais et conditions d'essai	51
4.1 Objet des essais	51
4.2 Communication des résultats d'essai	51
4.3 Périmètre du système consommateur d'énergie pour les essais.....	51
4.3.1 Considérations générales	51
4.3.2 Installations de type discontinu.....	51
4.3.3 Installation de type continu	52
4.4 Exigences générales pour les essais	52
4.5 Conditions de fonctionnement pendant les essais	52
4.6 Conditions d'environnement pendant les essais	53
4.7 Tension d'alimentation	53
5 Comparaison des installations ou équipements	53
6 Mesurages et matériaux chargés	53
6.1 Généralités	53
6.2 Résolution temporelle	53
6.3 Mesure de la fréquence	53
6.4 Mesures des données électriques	53
6.4.1 Tension d'alimentation et courant	53
6.4.2 Tension, courant, puissance électrique et résistance	54
6.4.3 Emplacements de mesure.....	54
6.5 Mesure de la température	54
6.5.101 Sondes de trempage pour l'acier liquide ou le laitier	54
6.6 Mesure de la pression, de l'humidité ou de la composition des fluides	55
6.7 Matériau chargé.....	55
7 Modélisation numérique.....	56
8 Essais techniques.....	56
8.101 Généralités	56
8.102 Isolation électrique.....	56
8.103 Essai de fonctionnement à froid	56
8.104 Mise en service à chaud	57
8.104.1 Généralités	57
8.104.2 Consommation d'énergie pendant l'opération de maintien.....	57
8.104.3 Consommation d'énergie pendant le fonctionnement normal.....	57
8.104.4 Capacité assignée du four à arc	57
8.105 Préparation de l'essai de performance	58
8.105.1 Dépendance des performances par rapport à la tension d'alimentation	58
8.105.2 Plage de traitement du fonctionnement prévu	58
8.105.3 Essai de court-circuit	58
8.105.4 Consommation d'électrodes.....	59

8.105.5	Temps de coulée à coulée	59
8.105.6	Temps de maintien de la puissance	59
8.105.7	Durée d'arc.....	59
8.105.8	Temps de traitement.....	59
8.105.9	Puissance apparente	59
8.105.10	Puissance active.....	59
8.105.11	Puissance réactive	59
8.105.12	Facteur de puissance	59
9	Rendement de l'installation.....	60
9.1	Généralités	60
9.2	Consommation énergétique spécifique.....	60
9.3	Efficacité du chauffage dans une installation de four à arc.....	60
9.4	Efficacité de la consommation électrique	61
9.5	Efficacité du transfert d'énergie.....	61
Annexe A (informative)	Évaluation de l'efficacité énergétique	62
Annexe B (informative)	Représentation visuelle des informations d'efficacité énergétique	63
B.101	Généralités	63
B.102	Diagramme de Sankey d'équilibre des puissances – à adapter à la route des FAE	63
B.103	Diagramme d'utilisation de puissance dans le temps.....	64
Annexe C (informative)	Estimation de l'utilisation d'énergie	67
C.1	Généralités	67
C.2	Consommation minimale d'énergie.....	67
C.3	Puissance de maintien	68
C.4	Pertes de transfert et efficacité du transfert	68
C.5	Exemples.....	68
Annexe D (informative)	Récupérabilité énergétique.....	69
Annexe AA (informative)	Procédures d'essai de court-circuit (essai de trempage).....	70
AA.1	Généralités	70
AA.1.1	Four à arc électrique à courant alternatif	70
AA.1.2	Four à arc électrique à courant continu.....	70
AA.2	Système à haute intensité: résistance et réactance d'un four à arc électrique à courant alternatif.....	70
AA.3	Impédances déterminées par essai de court-circuit.....	70
AA.4	Procédures d'essai des fours à arc électrique à courant alternatif.....	71
AA.5	Facteur d'asymétrie des réactances.....	75
AA.6	Incertitudes des mesures de court-circuit de fonctionnement	76
Bibliographie.....		77

Figure B.101 – Diagramme de Sankey d'un four à arc électrique à courant continu de 130 MVA (voir la Bibliographie, Kühn)..... 64

Figure B.102 – Exemple de diagramme d'utilisation de puissance dans le temps pour la fusion de ferrailles dans un FAE..... 65

Figure AA.1 – Schéma unifilaire type pour le mesurage des données électriques du système à haute intensité afin de déterminer les valeurs de résistance et de réactance..... 72

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

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

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Électrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. À cet effet, l'IEC – 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 l'IEC"). 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 l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC 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 l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC 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 l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC 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 l'IEC. L'IEC 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 l'IEC, 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 l'IEC, 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 l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, 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'IEC attire l'attention sur le fait que la mise en application du présent document peut entraîner l'utilisation d'un ou de plusieurs brevets. L'IEC ne prend pas position quant à la preuve, à la validité et à l'applicabilité de tout droit de brevet revendiqué à cet égard. À la date de publication du présent document, l'IEC n'avait pas reçu notification qu'un ou plusieurs brevets pouvaient être nécessaires à sa mise en application. Toutefois, il y a lieu d'avertir les responsables de la mise en application du présent document que des informations plus récentes sont susceptibles de figurer dans la base de données de brevets, disponible à l'adresse <https://patents.iec.ch>. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié tout ou partie de tels droits de brevet.

L'IEC 60676 a été établie par le comité d'études 27 de l'IEC: Chauffage électrique industriel et traitement électromagnétique. Il s'agit d'une Norme internationale.

Cette quatrième édition annule et remplace la troisième édition parue en 2011. Cette édition constitue une révision technique.

Cette édition inclut les modifications techniques majeures suivantes par rapport à l'édition précédente:

- a) la structure a été alignée sur l'IEC 60398:2015;
- b) le domaine d'application a été repris;

- c) les termes et définitions, les références normatives et la bibliographie ont été mis à jour et complétés;
- d) les méthodes d'essai et le contenu de l'IEC 60398:2015 ont été confirmés, remplacés ou complétés en ce qui concerne les fours à arc direct (FAE, LF);
- e) les annexes de l'IEC 60398:2015 ont été confirmées, remplacées ou complétées en ce qui concerne les fours à arc direct (FAE, LF).

Le texte de cette Norme internationale est issu des documents suivants:

Projet	Rapport de vote
27/1181/FDIS	27/1184/RVD

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

La langue employée pour l'élaboration de cette Norme internationale est l'anglais.

La version française de la norme n'a pas été soumise au vote.

La présente norme doit être lue conjointement avec l'IEC 60398:2015. Elle complète ou remplace les articles correspondants de l'IEC 60398:2015. Lorsque le texte indique une "modification", une "addition" ou un "remplacement" de la disposition correspondante de l'IEC 60398:2015, ces modifications sont apportées au texte correspondant de l'IEC 60398:2015. Lorsqu'aucune modification n'est nécessaire, la phrase "L'article de l'IEC 60398:2015 s'applique" est utilisée. Lorsqu'un paragraphe particulier de l'IEC 60398:2015 n'est pas mentionné dans la présente norme, ce paragraphe s'applique pour autant que cela soit raisonnable. Lorsqu'un paragraphe particulier de l'IEC 60398:2015 ne s'applique pas, le terme "Vacant" est utilisé.

Dans la présente norme, les caractères d'imprimerie suivants sont utilisés:

- termes définis à l'Article 3: **caractères gras**.

Le présent document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2, il a été développé selon les Directives ISO/IEC, Partie 1 et les Directives ISO/IEC, Supplément IEC, disponibles sous www.iec.ch/members_experts/refdocs. Les principaux types de documents développés par l'IEC sont décrits plus en détail sous www.iec.ch/publications.

Le comité a décidé que le contenu du présent document ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous webstore.iec.ch dans les données relatives au document recherché. À cette date, le présent document sera

- reconduit,
- supprimé, ou
- révisé.

IMPORTANT – Le logo "colour inside" qui se trouve sur la page de couverture de ce document indique qu'il contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer ce document en utilisant une imprimante couleur.

INTRODUCTION

Les fours à arc électrique direct sont des applications très importantes pour la fusion des ferrailles d'acier, la fusion du fer de réduction directe (FRD), du fer briqueté à chaud (HBI, *Hot Bricked Iron*) ou du métal chaud, tandis que les fours poches sont principalement utilisés pour assurer la qualité exigée et le réglage final de la température de l'acier fondu avant l'envoi vers une machine de coulée ou des stations de traitement sous vide.

Le fabricant de l'installation ou de l'équipement respecte généralement les exigences suivantes, qui proviennent de différentes sources et suivent assez souvent cet ordre de priorité:

- a) permettre la réalisation du processus prévu et faire fonctionner l'installation correctement;
- b) être rentable lors de la conception et de la fabrication;
- c) s'assurer que l'utilisation de l'équipement est sûre en écartant tout risque inacceptable de blessure physique ou d'atteinte à la santé de l'opérateur (sécurité au sens plus strict de l'ISO 12100:2010);
- d) s'assurer que l'utilisation de l'équipement est sûre en écartant tout risque inacceptable de blessure physique ou d'atteinte à la santé des personnes, ou d'endommagement des biens ou de l'environnement (ce qui ajoute d'autres objectifs de sécurité au point c) selon la définition beaucoup plus large de la sécurité du Guide 51 de l'ISO/IEC);
- e) démontrer que le fonctionnement de l'équipement est rentable et qu'il utilise des quantités suffisamment restreintes d'énergie, de matériaux et autres ressources.

Il relève généralement du savoir-faire exclusif du fabricant ou de l'utilisateur de l'équipement de capitaliser celui-ci ou de permettre la réalisation des processus prévus avec un bénéfice. L'IEC 60519-1 et l'IEC 60519-4 contribuent à assurer la sécurité au sens de l'ISO 12100:2010. Le présent document se concentre sur les exigences fondamentales relatives aux instruments de mesure et aux méthodes d'essai concernant l'efficacité énergétique et des ressources, la réalisation du processus prévu et l'évaluation du coût de possession des installations et des équipements.

Le présent document considère que l'installation ou l'équipement est exploité et entretenu uniquement par du personnel composé de personnes qualifiées ou formées.

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

1 Domaine d'application

L'article de l'IEC 60398:2015 est remplacé par le texte suivant.

Remplacement:

Le présent document spécifie les procédures, les conditions et les méthodes d'essai fondamentales pour établir les principaux paramètres de performance et les principales caractéristiques de fonctionnement des fours qui utilisent le chauffage par arc direct, qui forme des arcs entre l'**électrode** et le métal, tels que les fours à arc électrique à courant alternatif (**EAF AC**, *Electric Arc Furnace using Alternating Current*) ou à courant continu (**EAF DC**, *Electric Arc Furnace using Direct Current*), et les fours poches (LF, *Ladle Furnace*), avec un niveau de puissance assignée supérieur à 500 kVA.

Les mesurages et les essais qui sont utilisés aux seules fins de la vérification des exigences de sécurité des équipements des fours à arc électrique direct n'entrent pas dans le domaine d'application du présent document et sont couverts par l'IEC 60519-1, l'IEC 60519-4 et l'ISO 13578.

Le présent document s'applique à la mise en service, à la vérification des améliorations de conception ou aux tâches liées à l'énergie en ce qui concerne l'utilisation d'énergie ou l'efficacité énergétique, l'établissement d'une référence énergétique et l'étiquetage. Certains concepts du présent document peuvent être directement utilisés comme indicateurs de performance clés.

Les essais particuliers de types spécifiques d'équipements et d'installations de fours à arc électrique n'entrent pas dans le domaine d'application du présent document. L'objet du présent document est de servir de référence générale pour toutes les futures normes d'essais applicables aux équipements ou installations de fours à arc électrique particuliers.

Le présent document inclut le concept et les éléments de l'IEC 60398 relatifs à l'efficacité énergétique pour les parties électriques et de traitement des équipements, ainsi qu'à la performance globale.

Les méthodes d'essai pour certains équipements spéciaux, tels que les convertisseurs à semiconducteurs, sont couvertes par l'IEC 60146-1-1 et les **transformateurs de four** sont couverts par la série IEC 60076.

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

2 Références normatives

L'article de l'IEC 60398:2015 est remplacé par le texte suivant.

Remplacement:

Les documents suivants sont cités dans le texte de sorte qu'ils constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences 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).

IEC 60398:2015, *Installations pour traitement électrothermique et électromagnétique – Méthodes générales d'essai de fonctionnement*

IEC 60519-1, *Sécurité dans les installations destinées au traitement électrothermique et électromagnétique – Partie 1: Exigences générales*

IEC 60519-4:2021, *Sécurité dans les installations destinées au traitement électrothermique et électromagnétique – Partie 4: Exigences particulières pour les installations de fours à arc*

ISO 13578, *Fours industriels et équipements associés – Exigences de sécurité pour les machines et les équipements pour la production d'acier par four à arc électrique*

3 Termes, définitions et abréviations

3.1 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions de l'IEC 60398:2015 ainsi que les suivants s'appliquent.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <https://www.iso.org/obp>
- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <https://www.electropedia.org>

NOTE Les termes et définitions se réfèrent aux fours à arc électrique et/ou aux fours poches, le cas échéant.

3.1.101

puissance active

P

en régime périodique, moyenne, sur une période T , de la puissance instantanée p

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

Note 1 à l'article: En régime sinusoïdal, la puissance active est la partie réelle de la puissance complexe $\underline{S}$, soit $P = \operatorname{Re}(\underline{S})$.

Note 2 à l'article: L'unité SI cohérente de puissance active est le watt, W.

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

3.1.102

puissance apparente

S

puissance assignée du **transformateur de four** qui alimente le four à arc électrique ou le four poche (en MVA)

$$S = \sqrt{3} \, UI \quad (\text{pour un réseau triphasé})$$

où

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

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

[SOURCE: IEC 60050-131:2002, 131-11-41, modifié – plus précis]

3.1.103**four à arc**

four qui comporte une enceinte, dans laquelle une charge métallique, ou autre charge conductrice, est chauffée principalement par un arc électrique ou par effet Joule, en courant alternatif (AC) ou continu (DC)

[SOURCE: IEC 60050-841:2004, 841-26-05, modifié – plus précis]

3.1.104**durée d'arc**

durée réelle du flux de courant pendant le temps de maintien de la puissance

Note 1 à l'article: La durée d'arc représente un pourcentage élevé du temps de maintien de la puissance.

Note 2 à l'article: Elle est exprimée en minutes (min).

3.1.105**facteur d'asymétrie**

K

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

3.1.106**transformateur de four à arc**

transformateur qui transforme l'alimentation électrique haute tension en plus basse tension et en courant plus élevé dans le cadre du traitement d'un four à arc

[SOURCE: IEC 60050-841:2004, 841-26-55, modifié – plus précis]

3.1.107**capacité**

<d'un four à arc électrique> quantité de matériau liquide qui peut être produit dans le four à arc électrique au cours d'une période de chauffe (en t)

Note 1 à l'article: En tonnes métriques ou en tonnes courtes selon les conditions préalablement définies.

3.1.108**état froid**

<d'un 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

3.1.109**bus propre**

système de bus à haute tension qui alimente l'équipement auxiliaire (par exemple, centre de commande de moteur, système de commande) où les distorsions du réseau sont considérées comme inférieures à celles du système de bus sale

3.1.110**inductance à courant continu**

<inductance de lissage> bobine d'inductance qui permet le lissage des fluctuations électriques de haute fréquence, dues à des modifications des conditions d'arc

Note 1 à l'article: Si plusieurs **redresseurs** sont couplés dans le système, les bobines d'inductance peuvent également réduire les fluctuations.

3.1.111**bus sale**

système de bus à haute tension qui alimente le **transformateur de four** et qui contient les distorsions du réseau dues au processus (par exemple, papillotement, harmoniques)

Note 1 à l'article: Les valeurs de distorsion sur le bus sale peuvent dépasser les limites de la qualité de puissance du réseau.

3.1.112**sectionneur****commutateur de terre**

commutateur à moteur qui n'est pas un commutateur de charge, qui fournit une distance de sécurité visible et assure la connexion à la terre, installé entre l'appareillage de commutation du four et le transformateur du four

3.1.113**four à arc électrique à courant alternatif****EAF AC**

four à courant alternatif dans lequel se forment des arcs électriques entre les électrodes et le matériau conducteur

Note 1 à l'article: L'abréviation "EAF AC" est dérivée du terme anglais développé correspondant "electric arc furnace using alternating current".

[SOURCE: IEC 60050-841:2004, 841-26-07, modifié – plus précis]

3.1.114**four à arc électrique à courant continu****EAF DC**

four dans lequel le courant continu est conduit au travers d'une ou de plusieurs électrodes de sole (anodes) vers le matériau à traiter, en formant des arcs entre le matériau et l'électrode ou les électrodes supérieures (cathodes)

Note 1 à l'article: L'abréviation "EAF DC" est dérivée du terme anglais développé correspondant "electric arc furnace using direct current".

[SOURCE: IEC 60050-841:2004, 841-26-06, modifié – plus précis]

3.1.115**électrode de four à arc électrique****électrode de four poche**

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

[SOURCE: IEC 60050-841:2004, 841-26-38, modifié – plus précis]

3.1.116**cuve de four**

enceinte de **four à arc** réalisée en métal (actuellement en acier) et recouverte d'une voûte

[SOURCE: IEC 60050-841:2004, 841-26-20, modifié – plus précis]

3.1.117**appareillage de commutation de four**

appareillage de commutation à haute tension qui relie le **transformateur de four** à l'alimentation électrique en assurant une commutation marche/arrêt en charge

3.1.118**fusion thermique**

métal liquide qui est coulé après le traitement d'une fournée d'un four à arc électrique dans une poche

Note 1 à l'article: Une fusion thermique produite au cours d'un cycle de traitement.

3.1.119**système à haute intensité**

ensemble de conducteurs destiné à transporter le courant élevé entre les traversées secondaires du **transformateur de four** et l'électrode ou les électrodes

Note 1 à l'article: Il 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.

[SOURCE: IEC 60050-841:2004, 841-26-54, modifié – plus précis]

3.1.120**état chaud**

<d'un four à arc électrique> état thermique d'un four à arc électrique dans lequel la température du revêtement est supérieure à 600 °C et une température constante des composants est atteinte

3.1.121**court-circuit de fonctionnement**

court-circuit dû au contact direct de deux électrodes au moins dans un **four à arc électrique à courant alternatif** avec un matériau chargé/liquide

Note 1 à l'article: Dans un **four à arc électrique à courant continu**, un court-circuit se produit si l'**électrode** supérieure est en contact avec le matériau chargé/liquide.

[SOURCE: IEC 60050-841:2004, 841-26-70, modifié – plus précis]

3.1.122**rotation de phase**

séquence de phases du champ électromagnétique

3.1.123**facteur de puissance**

λ

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

$$\lambda = \frac{P}{S}$$

où

P est la puissance active [en MW]

S est la puissance apparente [en MVA]

Note 1 à l'article: $\cos \varphi$ ne contient que la fréquence fondamentale du réseau, 50 Hz/60 Hz.

Note 2 à l'article: λ contient la fréquence fondamentale et les harmoniques.

3.1.124**temps de maintien de la puissance**

temps du premier amorçage de l'arc jusqu'à l'arrêt du disjoncteur de four par **fusion thermique**

Note 1 à l'article: Il est exprimé en minutes (min).

3.1.125

temps de traitement

durée réelle de l'entrée d'énergie (électricité, gaz, oxygène, etc.)

Note 1 à l'article: Il est exprimé en minutes (min).

3.1.126

taux de production

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

Note 1 à l'article: Il est exprimé en t/h.

3.1.127

puissance réactive

Q

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

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (\text{pour un réseau triphasé})$$

[SOURCE: IEC 60050-131:2002, 131-11-44, modifié – plus précis]

3.1.128

redresseur

<d'un four à arc électrique> dispositif au moyen duquel un courant alternatif est transformé en courant continu

3.1.129

inductance série

inductance connectée en série au **transformateur de four** afin de réduire le plus possible les effets sur l'alimentation électrique provoqués par les arcs et d'assurer la stabilité de ceux-ci pendant le procédé

3.1.130

consommation d'énergie électrique massique

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

Note 1 à l'article: Elle est exprimée en kWh/t.

[SOURCE: IEC 60050-841:2004, 841-22-72, modifié – plus précis]

3.1.131

temps de coulée à coulée

t_{tt}

temps entre la fin de la coulée de la charge de fusion précédente et la fin de la coulée de la charge de fusion actuelle

Note 1 à l'article: Il est exprimé en minutes (min).

3.2 Abréviations

CA	Courant alternatif
CT (Current Transformer)	Transformateur de courant
DC (Direct Current)	Courant continu
FRD	Fer de réduction directe
EAF (Electric Arc Furnace)	Four à arc électrique
HBI (Hot Briquetted Iron)	Fer briqueté à chaud
LF (Ladle Furnace)	Four poche
GPL	Gaz de pétrole liquéfié
PT (Potential Transformer)	Transformateur de tension
FAS	Four à arc submergé
SVC (Static VAr Compensation)	Compensation statique d'énergie réactive

4 Dispositions fondamentales relatives aux essais et conditions d'essai

4.1 Objet des essais

Le paragraphe de l'IEC 60398:2015 s'applique.

4.2 Communication des résultats d'essai

Le paragraphe de l'IEC 60398:2015 s'applique, avec l'ajout suivant.

Addition:

Le type d'équipement de mesure ainsi que la disposition et l'organisation des points de mesure doivent être indiqués dans le rapport d'essai.

4.3 Périmètre du système consommateur d'énergie pour les essais

4.3.1 Considérations générales

Le paragraphe de l'IEC 60398:2015 s'applique, avec l'ajout suivant.

Addition:

- e) L'énergie utilisée pour les systèmes de nettoyage au gaz doit être incluse dans les calculs d'énergie utilisée et perdue.

4.3.2 Installations de type discontinu

Le paragraphe de l'IEC 60398:2015 ne s'applique pas et est remplacé par le texte suivant.

Remplacement:

Les installations de FAE fonctionnent généralement en mode discontinu. Le processus type peut être décrit comme suit:

- a) chargement de la ferraille, etc., en une fournée/un panier au début de la fusion thermique;
- b) fusion et chargement de la fournée suivante/du panier suivant, qui contient de la ferraille, du fer de réduction directe (FRD), du fer briqueté à chaud (HBI) ou de l'acier métallique chaud. Le FRD ou le HBI peut être chargé en continu jusqu'à atteindre le poids de pleine charge;

- c) si seule de la ferraille est utilisée comme matière première, plusieurs fournées/paniers supplémentaires sont nécessaires pour atteindre le poids de chargement final;
- d) surchauffe et début du décrassage: chauffage du matériau fondu jusqu'à la température de coulée et début du décrassage;
- e) affinage: des alliages peuvent être chargés pour atteindre les qualités souhaitées. Dans certaines applications, l'affinage est effectué dans un four poche (LF);
- f) coulée du matériau fondu dans une poche;
- g) coulée du laitier résiduel dans le crassier/la poche à scories.

Dans certaines applications, des brûleurs peuvent être utilisés après le chargement des fournées/paniers. Du laitier moussant (ajout de chaux, de carbone et d'oxygène) est utilisé lors de la surchauffe et de l'affinage afin de protéger le revêtement et d'augmenter l'entrée de puissance électrique.

4.3.3 Installation de type continu

Le paragraphe de l'IEC 60398:2015 ne s'applique pas et est remplacé par le texte suivant.

Remplacement:

Les processus continus ou semi-continus des FAE ne sont pas courants.

4.4 Exigences générales pour les essais

Le paragraphe de l'IEC 60398:2015 s'applique, avec le remplacement suivant:

Remplacement:

Les exigences de sécurité pertinentes de l'IEC 60519-4 et les instructions du fabricant doivent être respectées lors de l'ensemble des essais, afin d'assurer la sécurité.

La conception du **transformateur de four**/de l'**inductance série** doit offrir au moins une combinaison pour permettre l'essai de trempage (voir Annexe AA).

Les caractéristiques et les paramètres définis à l'Article 8 doivent être vérifiés à l'**état chaud** de l'installation de FAE ou de LF:

- a) lors de la mise en service;
- b) lorsque l'installation est prête pour le fonctionnement normal;
- c) à intervalles réguliers, comme cela est spécifié par le fabricant;
- d) après la maintenance; ou
- e) après des modifications.

L'opérateur responsable des mesurages ou des essais doit être suffisamment formé pour réaliser des essais exacts et disposer de suffisamment de temps et de ressources pour effectuer les mesurages et les essais prévus et indiqués dans le présent document.

4.5 Conditions de fonctionnement pendant les essais

Le paragraphe de l'IEC 60398:2015 s'applique, avec l'ajout suivant.

Addition:

Les conditions préalables indiquées par le fabricant doivent être remplies.

4.6 Conditions d'environnement pendant les essais

Le paragraphe de l'IEC 60398:2015 s'applique.

4.7 Tension d'alimentation

Le paragraphe de l'IEC 60398:2015 s'applique, avec l'ajout suivant.

Addition:

Les fluctuations de tension et le niveau de défaut minimal de la ligne d'alimentation entrante doivent faire l'objet d'un accord entre le fournisseur et l'utilisateur.

Les essais doivent être réalisés indépendamment du statut de l'équipement de compensation (par exemple, SVC, Statcom, filtre). L'utilisation ou la non-utilisation de l'équipement de compensation doit être consignée dans le rapport d'essai.

NOTE Les essais des FAE avec utilisation d'équipements de compensation et sans utilisation d'équipements de compensation fournissent des informations sur le réseau (puissance de court-circuit/niveau de défaut).

5 Comparaison des installations ou équipements

Vacant.

6 Mesurages et matériaux chargés

6.1 Généralités

Le paragraphe de l'IEC 60398:2015 s'applique, avec l'ajout suivant.

Addition:

Il est nécessaire que type, le nombre et la qualité des mesurages et des matériaux chargés soient prédéfinis par l'utilisateur final et le fabricant.

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

6.2 Résolution temporelle

Le paragraphe de l'IEC 60398:2015 s'applique.

6.3 Mesure de la fréquence

Vacant.

6.4 Mesures des données électriques

6.4.1 Tension d'alimentation et courant

Le paragraphe de l'IEC 60398:2015 s'applique, avec le titre modifié.

6.4.2 Tension, courant, puissance électrique et résistance

Le paragraphe de l'IEC 60398:2015 s'applique, avec le remplacement suivant:

Remplacement:

Les transformateurs de tension et de courant doivent être divisés en 2 groupes: de mesure et de protection. Les transformateurs de mesure sont très exacts, mais ont une capacité de surcharge très limitée (en général 10 % à 20 %). Les transformateurs de protection ont généralement une exactitude de 10 %, mais peuvent être hautement surchargés (en général 10 fois).

NOTE 1 Pour les exigences relatives aux transformateurs de mesure, voir la série IEC 61869 et la série IEC 60044.

L'exactitude de l'équipement de mesure de la tension, du courant, de la puissance et de l'énergie dans la plage des fréquences du réseau et des fréquences inférieures doit être de classe 1,0 ou meilleure, non seulement pour les valeurs de facteur de puissance élevées $\geq 0,7$, mais aussi pour un facteur de puissance inférieur à 0,3, sauf spécification contraire.

L'unité électronique qui calcule la valeur efficace ne doit pas diminuer de manière significative l'exactitude des signaux de tension et de courant d'entrée.

L'équipement de mesure de la puissance active doit utiliser une sonde à quatre points, le cas échéant; le type de sonde utilisé doit faire partie du rapport d'essai.

NOTE 2 Voir Figure AA.1.

6.4.3 Emplacements de mesure

Le paragraphe de l'IEC 60398:2015 s'applique, avec l'ajout suivant:

Addition:

L'emplacement de mesure de la tension doit être le point d'entrée de la tension primaire avant l'emplacement de l'**inductance série**/du **transformateur de four** (voir Figure AA.1), sauf accord contraire entre le fabricant et l'utilisateur final.

Aucune connexion par câble entre le poste et l'**appareillage de commutation de four** ne doit être incluse dans la mesure.

6.5 Mesure de la température

Le paragraphe de l'IEC 60398:2015 s'applique, avec l'ajout suivant:

Addition:

6.5.101 Sondes de trempage pour l'acier liquide ou le laitier

La température du laitier et du métal chaud est mesurée de façon discontinue en fonction de l'évolution de la fusion.

Les dernières avancées indiquent l'utilisation de fibres de verre ou d'autres techniques pour le mesurage de la température dans les **fours à arc**.

L'erreur de mesure relative pour l'ensemble des mesurages de température conformes au présent document doit être incluse dans le rapport d'essai.

6.6 Mesure de la pression, de l'humidité ou de la composition des fluides

Le paragraphe de l'IEC 60398:2015 s'applique.

6.7 Matériau chargé

Le paragraphe de l'IEC 60398:2015 ne s'applique pas et est remplacé par le texte suivant:

Remplacement:

Le FAE est chargé d'un ou de plusieurs des matériaux suivants, en fonction des matières premières disponibles et des produits ciblés:

- a) ferraille;
- b) FRD (fer de réduction directe) ou HBI (fer briqueté à chaud);
- c) fonte liquide ou matériau de retour du four poche.

Les matériaux susmentionnés peuvent être mélangés, et l'ordre peut être défini en fonction de l'optimisation de l'entrée d'énergie (réduction des pertes calorifiques) et de l'optimisation du temps de maintien de la puissance.

L'entrée d'énergie électrique est assurée par d'autres vecteurs d'énergie, par exemple:

- d) gaz naturel, GPL (gaz de pétrole liquéfié) ou autres gaz développés dans le cadre de la réduction du CO₂, utilisés pour les brûleurs;
- e) oxygène nécessaire pour les brûleurs ainsi que pour la réaction chimique lors de la fusion;
- f) carbone si exigé par le processus.

Le nombre et la puissance installée des brûleurs doivent être établis par le fabricant du **four à arc**.

Il est nécessaire de protéger le revêtement par:

- g) le bon choix de matériau de revêtement;
- h) l'utilisation de laitier moussant (ajout de chaux, de carbone et d'oxygène), lorsque cela est possible;
- i) un profil de puissance bien choisi.

Les matières premières et les alliages sont chargés en fonction du produit cible exigé (qualité de l'acier).

Les nuances d'acier fortement alliées (par exemple, Cr, Mn, etc.) exigent des quantités importantes d'alliages et sont donc chargées au début de la fusion. Les plus faibles quantités d'alliages peuvent être chargées à la fin de la fusion dans le FAE ou le LF, selon l'analyse des échantillons.

7 Modélisation numérique

L'article de l'IEC 60398:2015 ne s'applique pas et est remplacé par le texte suivant.

Remplacement:

Des calculs numériques peuvent être utilisés, si les mesurages ne sont pas possibles en raison d'un manque d'accessibilité, d'une complexité excessive, d'un coût trop élevé ou de la non-disponibilité d'équipements de mesure. De nombreuses solutions mathématiques sont disponibles en fonction du sujet réel à traiter. Les recommandations concernant l'utilisation de méthodes spécifiques ne relèvent pas du domaine d'application du présent document, mais des exigences générales minimales pour la réalisation d'essais numériques peuvent être données.

L'exactitude du calcul doit être comparable à l'exactitude réalisable des mesurages. Les résultats exigés définissent l'exactitude nécessaire de la configuration géométrique mise en œuvre et de l'effort numérique, comme la résolution du réseau ou les cycles itératifs.

L'utilisation de données calculées en lieu et place de mesures doit être clairement indiquée. La documentation du calcul doit comprendre:

- a) la méthode numérique utilisée;
- b) la configuration géométrique utilisée;
- c) toutes les données de modélisation pertinentes;
- d) une description des modèles utilisés pertinents pour le calcul;
- e) le logiciel et la version utilisés;
- f) tout paramètre défini du logiciel qui influence le résultat;
- g) la méthode utilisée pour la vérification des modèles utilisés et du calcul lui-même.

NOTE Les documents/données spécifiés ci-dessus ne font pas nécessairement partie de la documentation de l'utilisateur.

8 Essais techniques

L'article de l'IEC 60398:2015 ne s'applique pas et est remplacé par le texte suivant.

Remplacement:

8.101 Généralités

Dans tous les cas, la définition du périmètre du système consommateur d'énergie donnée en 4.3 s'applique et l'utilisation de ce périmètre doit faire l'objet d'une attention particulière. Toutes les données pertinentes doivent être mesurées ou calculées et enregistrées.

Les essais de fonctionnement à froid, la mise en service à froid et la mise en service à chaud doivent généralement être définis entre le fabricant et l'utilisateur final et effectués par ceux-ci.

8.102 Isolation électrique

Pour les mesurages de l'isolation, voir l'IEC 60519-4:2021.

8.103 Essai de fonctionnement à froid

La condition préalable est que toutes les parties prenantes impliquées dans les travaux et les installations de montage aient confirmé l'état de préparation de l'installation pour l'essai de fonctionnement à froid (par exemple, protocole de fin de montage).

L'essai de fonctionnement à froid des installations est réalisé comme suit:

- a) à l'état froid d'un four à arc électrique;
- b) l'installation est prête à fonctionner sans matériau chargé, essai de rotation de phase inclus;
- c) pour la validation de la sécurité, voir l'IEC 60519-4;
- d) au moins les résultats des essais de fonctionnement à froid doivent être documentés.

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 s'effectuer dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, observée du dessus du four à arc. 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.

8.104 Mise en service à chaud

8.104.1 Généralités

La mise en service à chaud consiste à chauffer la **cuve de four** et les **électrodes** pour arriver à un état aussi proche que raisonnablement possible du fonctionnement en veille à l'état chaud, le cas échéant.

8.104.2 Consommation d'énergie pendant l'opération de maintien

Dans certains cas, il est nécessaire de maintenir la température de l'acier liquide à l'intérieur de l'enceinte dans une plage constante (par exemple, dysfonctionnements des processus suivants).

La consommation d'énergie totale pendant le maintien et la durée du maintien est mesurée sur une période suffisamment longue pour permettre d'établir une moyenne.

8.104.3 Consommation d'énergie pendant le fonctionnement normal

Toutes les mesures de la consommation d'énergie électrique doivent refléter la consommation spécifique par des parties définies de l'installation pendant une durée définie ou au cours d'une opération spécifiée. Le cas échéant, les éléments suivants doivent être consignés:

- a) la consommation d'énergie d'une installation de type discontinu au cours d'une fusion complète; cette consommation peut être mesurée et moyennée sur un nombre défini de fusions. Le nombre de fusions et la variation de la consommation d'énergie doivent être enregistrés dans le rapport de mesure;
- b) l'énergie d'une installation à fonctionnement continu au cours du traitement d'une quantité de matériau chargé définie lorsque l'installation est à l'état stationnaire;
- c) la consommation d'énergie de l'installation sur un cycle de production complet (par exemple, au cours d'une journée de travail ou d'une semaine).

8.104.4 Capacité assignée du four à arc

Conditions: la **cuve de four**, le revêtement réfractaire doivent être à l'état chaud. Le matériau chargé (métal et additifs) ainsi que les procédures (fusion, surchauffe, décrassage, coulée, etc.) doivent être conformes aux recommandations du fournisseur. La charge de fusion est coulée lorsque la composition et la température finales sont atteintes.

Dans le cas d'un four à arc électrique avec coulée par le fond, la présence d'un fond liquide à l'intérieur du four doit être envisagée.

La masse de métal liquide coulé peut être mesurée ou calculée, par exemple:

- a) en utilisant le poids chargé, corrections incluses (par exemple, laitier, poussière, etc.);
- b) en mesurant la masse de métal liquide coulé (par exemple, système de pesée dans le wagon de coulée ou le pont de coulée, etc.);
- c) en utilisant les poids des produits en aval corrigés pour toute étape de production supplémentaire (par exemple, four poche, additifs, etc.).

Le taux de production net qui ne tient compte que du poids des fusions traitées et de la qualité prévue doit être indiqué pour le traitement d'une seule fournée ou pour une période définie. Il est normalement mesuré, par exemple, en fusions par jour, en tonnes par fusion, etc.

8.105 Préparation de l'essai de performance

Le fabricant et l'utilisateur doivent définir et fixer par accord les conditions préalables de l'essai de réception finale à un stade précoce, par exemple:

- a) la qualité de la matière première et l'humidité (teneur en eau ou en glace);
- b) la densité de la ferraille, la taille maximale d'un morceau de ferraille;
- c) le nombre de seaux/fournées de ferraille par fusion (un seau/une fournée ou plusieurs seaux/fournées);
- d) la ou les nuances d'acier exigées;
- e) la température de coulée;
- f) le temps de coulée à coulée;
- g) le temps de maintien de la puissance;
- h) l'entrée d'énergie électrique (kWh/t);
- i) toute autre entrée d'énergie (kWh/t);
- j) la qualité des **électrodes**;
- k) la consommation d'**électrodes**.

La composition et le contenu du matériau chargé doivent être constitués des mêmes matériaux que ceux utilisés pour la production prévue.

La spécification de l'essai de performance et la procédure d'essai ainsi que les paramètres et les critères utilisés pour l'évaluation des performances doivent être indiqués dans le rapport d'essai.

8.105.1 Dépendance des performances par rapport à la tension d'alimentation

La tension d'alimentation réelle et sa variation doivent être comprises dans la plage contractuelle prédéfinie.

8.105.2 Plage de traitement du fonctionnement prévu

La plage de traitement et le fonctionnement prévu doivent faire l'objet d'un accord préalable entre le fabricant et l'utilisateur. La plage d'utilisation prévue ne doit pas être dépassée.

8.105.3 Essai de court-circuit

La résistance et la réactance du **système à haute intensité** doivent être déterminées par un essai de court-circuit. La procédure d'essai de court-circuit est définie en Annexe AA.

8.105.4 Consommation d'électrodes

La consommation d'**électrodes** par masse de métal liquide coulé (en kg/t) est mesurée pendant un nombre contractuel prédéfini de 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.

$$g_{el} = \frac{G_{el}}{G}$$

où

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

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

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

8.105.5 Temps de coulée à coulée

Le **temps de coulée à coulée** doit être mesuré, par exemple en utilisant les signaux du système de commande.

8.105.6 Temps de maintien de la puissance

Le **temps de maintien de la puissance** doit être mesuré, par exemple en utilisant les signaux du système de commande.

8.105.7 Durée d'arc

La **durée d'arc** doit être mesurée, par exemple en utilisant les signaux du système de commande.

8.105.8 Temps de traitement

Le **temps de traitement** doit être mesuré, le cas échéant, en utilisant les signaux du système de commande (par exemple, **cuve de four** double, etc.).

8.105.9 Puissance apparente

La **puissance apparente** doit être mesurée.

8.105.10 Puissance active

La **puissance active** doit être mesurée.

8.105.11 Puissance réactive

La **puissance réactive** doit être calculée en utilisant des mesures de courant et de tension.

8.105.12 Facteur de puissance

Le **facteur de puissance** doit être calculé ou mesuré directement.

9 Rendement de l'installation

9.1 Généralités

Le paragraphe de l'IEC 60398:2015 s'applique, avec l'ajout suivant.

Addition:

Le rendement de l'installation de **four à arc** doit être divisé entre la charge de l'équipement de traitement principal connecté au **bus sale** (par exemple, **transformateur de four**) et celle de l'équipement auxiliaire connecté au **bus propre** (par exemple, système de commande, moteurs à basse tension).

Il est nécessaire que les valeurs spécifiées de la consommation d'énergie fassent l'objet d'un accord entre le fabricant et l'utilisateur. À l'heure actuelle, l'efficacité énergétique se réfère uniquement au **transformateur de four** connecté au **bus sale**.

9.2 Consommation énergétique spécifique

Le paragraphe de l'IEC 60398:2015 s'applique, avec le remplacement suivant:

Remplacement:

L'énergie consommée pour le traitement du matériau chargé, ramenée à la quantité de matériau chargé, est calculée à partir de la consommation d'énergie de l'équipement de traitement principal, qui inclut la consommation d'énergie des opérations de démarrage, de maintien, de fonctionnement en veille à l'état chaud et de mise à l'arrêt. Il s'agit de la consommation d'énergie totale moyenne de l'équipement de traitement principal, divisée par la quantité de matériau chargé de la qualité prévue traitée durant la période de mesure. Il s'agit de la consommation d'énergie par unité de poids.

Le calcul doit être réalisé à partir des données issues des essais applicables définis du 8.105.1 au 8.105.12. La valeur consignée doit inclure la base de temps utilisée pour l'essai.

9.3 Efficacité du chauffage dans une installation de four à arc

Le paragraphe de l'IEC 60398:2015 ne s'applique pas et est remplacé par le texte suivant (avec le titre modifié).

Remplacement:

L'efficacité du chauffage est calculée à l'aide de la formule suivante:

$$\eta_{\text{furnace}} = E_{\text{min}} / E_{\text{furnace}}$$

où

η_{furnace} est l'efficacité du chauffage de l'équipement de traitement principal de l'installation de four à arc;

E_{min} est la consommation énergétique spécifique minimale théorique définie à l'Annexe C, l'énergie minimale théoriquement nécessaire;

E_{furnace} est la consommation énergétique spécifique de l'équipement de traitement principal de l'installation de four à arc.

9.4 Efficacité de la consommation électrique

Vacant.

9.5 Efficacité du transfert d'énergie

Le paragraphe de l'IEC 60398:2015 s'applique, avec le remplacement suivant:

Remplacement:

L'estimation de l'efficacité du transfert d'énergie au matériau chargé constitue habituellement une tâche complexe. Les méthodes d'essai concernant l'efficacité du transfert d'énergie entre l'installation et le matériau chargé sont décrites à l'Annexe C.

L'efficacité du transfert d'énergie entre l'installation et le matériau chargé pendant le traitement est influencée par différentes caractéristiques particulières de l'installation et du matériau chargé, telles que:

- a) la taille et la composition du matériau chargé, qui peuvent varier au cours du traitement;
- b) le transport par convection de la chaleur à l'intérieur de l'installation et à l'extérieur de l'installation (cela inclut le refroidissement intentionnel de parties de l'installation);
- c) les pertes par conduction thermique entre le matériau chargé ou l'installation et l'extérieur.

Les dispositions relatives aux conditions d'essai données en 4.5 doivent s'appliquer. Des précautions particulières doivent être prises pour surveiller les conditions d'essai et les effets qui peuvent influencer les résultats de l'essai.

Alors que différentes catégories d'installations sont destinées à de nombreux processus différents, seuls certains de ces processus permettent le mesurage exact de l'énergie transférée à un matériau chargé. De nombreux paramètres de processus sont difficiles à collecter pendant le traitement:

- d) l'énergie calorifique stockée dans le matériau chargé peut être calculée à partir de l'échauffement du matériau chargé, si sa masse et sa chaleur spécifique $c_p(T)$ sont connues;
- e) l'énergie d'évaporation peut être estimée, si la température, la masse évaporée, la chaleur spécifique et l'enthalpie d'évaporation du solvant qui s'évapore sont connues;
- f) l'énergie nécessaire aux réactions chimiques peut être estimée si la masse du matériau chargé soumis à une réaction chimique est connue, ainsi que l'énergie nécessaire à la réaction.

Les essais qui utilisent le matériau chargé prévu peuvent donner des résultats raisonnablement exacts.

Annexe A
(informative)

Évaluation de l'efficacité énergétique

L'Annexe de l'IEC 60398:2015 s'applique.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60676:2024

Annexe B (informative)

Représentation visuelle des informations d'efficacité énergétique

L'Annexe de l'IEC 60398:2015 est remplacée par le texte suivant:

Remplacement:

B.101 Généralités

La présente Annexe B traite de la représentation graphique des informations relatives à l'efficacité énergétique, car les informations d'efficacité fournies sous la forme d'un chiffre unique ne sont bien souvent pas suffisantes pour engager une évaluation des mesures possibles de réduction de la consommation d'énergie. L'ISO 13579-1 fournit des informations à cet égard.

De telles informations sont habituellement produites lors de la mise en service, voire ultérieurement au cours du fonctionnement normal sur une période prolongée.

B.102 Diagramme de Sankey d'équilibre des puissances – à adapter à la route des FAE

Un diagramme de Sankey d'utilisation et d'équilibre des puissances constitue un moyen simple et très performant pour représenter l'utilisation d'énergie, les pertes d'énergie et les principales sources de perte.

Toutes les entrées d'énergie sont prises en compte pour créer un diagramme d'équilibre des puissances pertinent:

- la **consommation d'énergie électrique massique** au raccordement de l'installation au réseau;
- toute l'énergie non électrique comme enthalpie de combustible en provenance d'une réserve sur le site de l'usine;
- les pertes d'eau de refroidissement représentées sur la Figure B.101 comprennent les pertes dues au **transformateur de four**, à l'**inductance série** et aux parties refroidies par eau, le cas échéant.

La Figure B.101 représente un exemple de diagramme de Sankey pour un **four à arc électrique à courant continu** de 130 MVA.