



UNITED NATIONS  
INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION



Directives techniques pour le développement de la petite  
hydroélectricité

**UNITÉS**

## **Partie 4 : Système d'excitation**

**SHP/TG 003-4 : 2019**



## **CLAUSE DE NON-RESPONSABILITÉ**

Le présent document n'a pas été revu par les services d'édition de l'Organisation des Nations Unies. Les appellations employées dans le présent document et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part du Secrétariat de l'Organisation des Nations Unies pour le développement industriel (ONUDI) aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones, ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites, ou à leur système économique ou degré de développement. Les qualificatifs tels que « développé », « industrialisé » et « en développement » ne sont employés que pour des raisons de commodité statistique et n'expriment pas nécessairement un jugement sur le stade de développement atteint par un pays ou par une zone particulière. La mention de noms de sociétés ou de produits commerciaux ne signifie pas que l'ONUDI approuve lesdites sociétés ou produits. Bien que les auteurs du présent document aient veillé avec le plus grand soin à l'exactitude des informations y figurant, l'ONUDI et ses États Membres n'assument aucune responsabilité en ce qui concerne les conséquences qui pourraient découler de leur utilisation. Le présent document peut être cité ou réimprimé librement, mais une telle utilisation doit faire mention de la source.

Directives techniques pour le développement de la petite  
hydroélectricité

**UNITÉS**

## **Partie 4 : Système d'excitation**

**SHP/TG 003-4 : 2019**

## REMERCIEMENTS

Les directives techniques sont le fruit d'une collaboration entre l'Organisation des Nations unies pour le développement industriel (ONUDI) et le Centre International sur la Petite Hydraulique (INSHP). Environ 80 experts internationaux et 40 organismes internationaux ont participé à l'élaboration et à l'examen par les pairs du document, fournissant observations et suggestions concrètes pour garantir le professionnalisme et l'applicabilité des directives.

L'ONUDI et le Centre International sur la Petite Hydraulique apprécient grandement les contributions apportées lors de l'élaboration de ces directives et en particulier celles des organisations internationales suivantes :

- Le marché commun de l'Afrique orientale et australe (COMESA)

- Le réseau mondial de centres régionaux pour les énergies renouvelables (GN-SEC), en particulier le Centre de la CEDEAO pour les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique (ECREEE), le Centre d'Afrique de l'Est pour les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique (EACREEE), le Centre du Pacifique pour les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique (PCREEE) et le Centre des Caraïbes pour les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique (CCREEE).

Le gouvernement chinois a facilité la finalisation de ces directives et a joué un rôle important dans leur élaboration.

L'élaboration de ces directives a grandement bénéficié des apports précieux, de la révision, des commentaires constructifs et des contributions reçues de M. Adnan Ahmed Shawky Atwa, M. Adoyi John Ochigbo, M. Arun Kumar, M. Atul Sarthak, M. Bassey Edet Nkposong, M. Bernardo Calzadilla-Sarmiento, Mme. Arun Kumar, M. Atul Sarthak, M. Bassey Edet Nkposong, M. Bernardo Calzadilla-Sarmiento, Mme Chang Fangyuan, M. Chen Changjun, Mme Chen Hongying, M. Chen Xiaodong, Mme Chen Yan, Mme Chen Yueqing, Mme Cheng Xialei, Mme Chileshe Kapaya Matantilo. Chileshe Kapaya Matantilo, Mme Chileshe Mpundu Kapwepwe, M. Deogratias Kamweya, M. Dolwin Khan, M. Dong Guofeng, M. Ejaz Hussain Butt, Mme Eva Kremere, Mme Fang Lin, M. Fu Liangliang, M. Garaio Donald Gafiye, M. Guei Guillaume Fulbert Kouhie, M. Guo Chenguang, M. Guo Hongyou, M. Harold John Annegam, Mme Hou ling, M. Hu Jianwei, Mme Hu Xiaobo, M. Hu Yunchu, M. Huang Haiyang, M. Huang Zhengmin, Mme Januka Gyawali, M. Jiang Songkun, M. K. M. Dharesan Unnithan, M. Kipyego Cheluget, M. Kolade Esan, M. Lamyser Castellanos Rigoberto, M. Li Zhiwu, Mme Li Hui, M. Li Xiaoyong, Mme Li Jingjing, Mme Li Sa, M. Li Zhenggui, Mme Liang Hong, M. Liang Yong, M. Lin Xuxin, M. Liu Deyou, M. Liu Heng, M. Louis Philippe Jacques Tavernier. Li Zhenggui, Mme Liang Hong, M. Liang Yong, M. Lin Xuxin, M. Liu Deyou, M. Liu Heng, M. Louis Philippe Jacques Tavernier, Mme Lu Xiaoyan, M. Lv Jianping, M. Manuel Mattiat, M. Martin Lugmayr, M. Mohamedain SeifElnasr, M. Mundia Simainga, M. Mukayi Musarurwa, M. Olumide TaiwoAlade, M. Ou Chuanqi, Mme. Pan Weiping, M. Ralf Steffen Kaeser, M. Rudolf Hupfl, M. Rui Jun, M. Rao Dayi, M. Sandeep Kher, M. Sergio Armando Trelles Jasso, M. Sindiso Ngwenga, M. Sidney Kilmete, Mme Sitraka Zarasoa Rakotomahefa, M. Shang Zhihong, M. Shen Cunke, M. Shi Rongqing, Mme Sanja Komadina, M. Tareqemtairah, M. Tokihiko Fujimoto, M. Tovoniaina Ramanantsoa Andriampaniry, M. Tan Xiangqing, M. Tong Leyi, M. Wang Xinliang, M. Wang Fuyun, M. Wang Baoluo, M. Wei Jianghui, M. Wu Cong, Mme Xie Lihua, M. Xiong Jie, Mme Xu Jie, Mme Xu Xiaoyan, M. Xu Wei, M. Yohane Mukabe, M. Yan Wenjiao, M. Yang Weijun, Mme Yan Li, M. Yao Shenghong, M. Zeng Jingnian, M. Zhao Guojun, M. Zhang Min, M. Zhang Min, M. Wang Baoluo, M. Weianghai, M. Wu Cong, Mme. Zhang Min, M. Zhang Liansheng, M. Zhang Zhenzhong, M. Zhang Xiaowen, Mme Zhang Yingnan, M. Zheng Liang, M. Zheng Yu, M. Zhou Shuhua, Mme Zhu Mingjuan.

Les suggestions et les recommandations concernant d'éventuelles mises à jour des directives sont les bienvenues.

## Table des matières

Avant-propos .....	II
Introduction.....	III
1 Portée .....	1
2 Références normatives .....	1
3 Termes et définitions.....	2
4 Conditions de service.....	2
4.1 Conditions environnementales.....	2
4.2 Conditions d'alimentation électrique.....	3
4.3 Autres conditions .....	3
5 Exigences techniques .....	3
5.1 Exigences de performance .....	3
5.2 Exigences fonctionnelles du système.....	6
5.3 Autres exigences techniques .....	8
6 Portée de la commande d'équipements et de pièces de rechange.....	9
6.1 Portée de la commande .....	9
6.2 Pièces de rechange.....	9
7 Documents techniques.....	9
8 Essais .....	10
8.1 Essais de livraison .....	10
8.2 Essais sur site.....	10
8.3 Essais de type .....	10
9 Plaque signalétique, emballage, transport et stockage .....	11
9.1 Plaque signalétique.....	11
9.2 Emballage.....	11
9.3 Transport .....	12
9.4 Stockage .....	12
10 Installation, fonctionnement et maintenance.....	12
10.1 Installation .....	12
10.2 Fonctionnement et maintenance.....	12
11 Période de garantie de la qualité.....	13
Annexe A (Informative) .....	14
Inspection et test d'acceptation sur site .....	14

## Avant-propos

L'ONUDI est un organisme spécialisé de l'Organisation des Nations Unies qui vise à promouvoir un développement industriel inclusif et durable à l'échelle mondiale. La pertinence du développement industriel inclusif et durable en tant qu'approche intégrée des trois piliers du développement durable (social, environnemental et économique) est reconnue par le Programme de développement durable à l'horizon 2030 et les objectifs de développement durable (ODD) correspondants, qui encadreront les efforts déployés par les Nations Unies et les pays en faveur d'un développement durable au cours des quinze prochaines années. Le mandat de l'ONUDI en ce qui concerne le développement industriel inclusif et durable répond à la nécessité d'appuyer la création de systèmes énergétiques durables, essentiels au développement économique et social et à l'amélioration de la qualité de vie. Les préoccupations internationales en matière d'énergie et les débats qu'elles suscitent ont pris de l'ampleur au cours des deux dernières décennies, les questions de la réduction de la pauvreté, des risques environnementaux et des changements climatiques occupant désormais le devant de la scène.

Le Centre International sur la Petite Hydraulique est une organisation internationale de coordination et de promotion du développement mondial de la petite hydroélectricité, qui s'appuie sur la participation volontaire de divers acteurs, notamment des points focaux régionaux, sous-régionaux et nationaux, ainsi que des institutions, des services publics et des entreprises, et dont l'objectif principal est le bénéfice social. Le Centre International sur la Petite Hydraulique s'emploie à promouvoir le développement mondial des petites centrales hydroélectriques en favorisant la coopération triangulaire, technique et économique, entre les pays en développement, les pays développés et les organisations internationales, en vue d'apporter aux zones rurales des pays en développement des solutions énergétiques adéquates, abordables et respectueuses de l'environnement ; ce qui leur permettra d'accroître les possibilités d'emploi, d'améliorer les conditions environnementales, de réduire la pauvreté, d'élever le niveau de vie des populations et les normes culturelles locales, et d'assurer le développement économique.

L'ONUDI et le Centre International sur la Petite Hydraulique collaborent à l'élaboration du Rapport mondial sur le développement des petites centrales hydroélectriques depuis 2010. D'après ce rapport, en l'état actuel, le développement de la petite hydroélectricité ne permet pas de répondre à la demande dans le monde. L'un des obstacles au développement, dans la plupart des pays, est le manque de technologies. L'ONUDI, en collaboration avec le Centre International sur la Petite Hydraulique et des experts issus de différents pays et organisations internationales, et sur la base d'expériences de développement réussies, a décidé d'établir les Directives techniques pour le développement de la petite hydroélectricité afin de répondre à la demande des États Membres.

Ces directives techniques ont été rédigés conformément aux règles éditoriales de la deuxième partie des Directives ISO/IEC, (voir [www.iso.org/directives](http://www.iso.org/directives)).

Nous appelons votre attention sur la possibilité que certains éléments de ces directives techniques soient soumis à des droits de brevet. L'ONUDI et le Centre International sur la Petite Hydraulique ne pourront être tenus responsables de l'identification de ces droits de brevet.

## Introduction

La petite hydroélectricité est de plus en plus considérée comme une solution énergétique renouvelable essentielle pour répondre de manière adéquate au défi de l'électrification des zones rurales reculées. Toutefois, si la plupart des pays d'Europe, d'Amérique du Nord et du Sud, ainsi que la Chine, disposent d'une importante capacité installée, le potentiel de la petite hydroélectricité dans de nombreux pays en développement reste inexploité et son développement est souvent entravé par divers facteurs, notamment l'absence de bonnes pratiques et de normes de développement de petites centrales hydroélectriques acceptées à l'échelle mondiale.

Fondées sur l'expertise et les meilleures pratiques en usage dans le monde entier, ces Directives techniques pour le développement de la petite hydroélectricité permettront de remédier aux limites actuelles des réglementations régissant le développement des petites centrales hydroélectriques. L'objectif est que les pays utilisent ces directives convenues pour améliorer leurs politiques actuelles, ainsi que les technologies dont ils disposent et leurs écosystèmes. Les pays disposant de capacités institutionnelles et techniques limitées pourront améliorer leurs connaissances dans le domaine du développement de la petite hydroélectricité, attirant ainsi davantage d'investissements, tout en encourageant la mise en place de politiques favorables qui, à terme, contribueront à accélérer le développement économique au niveau national. Ces Directives techniques seront utiles à tous les pays, mais surtout elles faciliteront l'échange de données d'expérience et de meilleures pratiques entre les pays aux capacités techniques limitées.

Les Directives techniques peuvent servir de principes et de base pour la planification, la conception, la construction et la gestion des petites centrales hydroélectriques dont la capacité n'excède pas 30 MW.

- La section « Termes et définitions » des Directives techniques définit les termes techniques professionnels couramment employés dans le domaine des petites centrales hydroélectriques.
- La section « Conception » des Directives techniques fournit des lignes directrices sur les exigences fondamentales, la méthodologie et les modalités des différentes étapes du projet : sélection du site, hydrologie, géologie, élaboration du projet, configurations, calculs énergétiques, hydraulique, sélection des équipements électromécaniques, construction, estimation des coûts du projet, évaluation économique, financement, évaluations sociales et environnementales ; l'objectif étant de déployer les meilleures solutions de conception compte tenu de l'ensemble de ces aspects.
- La section « Unités » des Directives techniques précise les exigences techniques relatives aux turbines, aux générateurs, aux systèmes de régulation des turbines hydroélectriques, aux systèmes d'excitation, aux vannes principales et aux systèmes de surveillance, de contrôle, de protection et d'alimentation électrique en courant continu des petites centrales hydroélectriques.
- La section « Construction » des Directives techniques peut servir de document d'orientation technique pour la construction de petites centrales hydroélectriques.
- La section « Gestion » des Directives techniques fournit des orientations techniques pour la gestion, l'exploitation et la maintenance ainsi que la rénovation technique et l'acceptation des projets de petites centrales hydroélectriques.

# Directives techniques pour le développement de la petite hydroélectricité-Unités

## Partie 4 : Système d'excitation

### 1 Portée

Cette partie des directives relatives aux unités précise les exigences techniques générales ainsi que les exigences de base relative à aux équipements et aux pièces de rechange devant être fournis, aux documents techniques, à l'inspection et à l'acceptation, à l'emballage, au transport, au stockage, à l'installation, à l'exploitation et à la maintenance du système d'excitation d'une petite centrale hydroélectrique.

Le présent document s'applique au système d'excitation des machines synchrones.

### 2 Références normatives

Les documents suivants sont mentionnés dans le texte de telle sorte que tout ou partie de leur contenu constitue des exigences du présent document. Dans le cas des références datées, seule l'édition citée est valable. Dans le cas des références non datées, c'est la dernière édition du document visé (modifications comprises) qui est valable.

IEEE 421.1, Standard Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines (Définitions standard pour les systèmes d'excitation pour machines synchrones)

IEEE 421.2, IEEE Guide for Identification, Testing, and Evaluation of the Dynamic Performance of Excitation Control Systems (Guide IEEE pour l'identification, le test et l'évaluation de la performance dynamique des systèmes de contrôle d'excitation)

IEEE 421.3, High potential test requirements for excitation systems for synchronous machines (Exigences de test de haute tension pour les systèmes d'excitation pour machines synchrones)

IEEE 421.4, IEEE Guide for the preparation of excitation system specifications (Guide IEEE pour la préparation des spécifications des systèmes d'excitation)

IEEE 421.5, IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies (Pratique recommandée IEEE pour les modèles de systèmes d'excitation pour les études de stabilité du système de puissance)

IEC 60034-16, Systèmes d'excitation pour machines synchrones

IEC 60529, Degrés de protection procurés par les enveloppes

SHP/TG 001, Directives techniques pour le développement de la petite hydroélectricité - Termes et définitions



### 3 Termes et définitions

Aux fins du présent document, les termes et définitions figurant dans les documents IEEE 421.1, IEEE 421.2, IEEE 421.5, IEC 60034-16, IEC 60529 et SHP/TG 001 s'appliquent.

### 4 Conditions de service

#### 4.1 Conditions environnementales

**4.1.1** L'équipement doit être placé à l'intérieur ou dans des endroits à l'abri des intempéries. Il doit être utilisé dans un environnement où l'air est propre, sans danger d'explosion, et sans présence de gaz ou de poussières conductrices pouvant endommager le métal ou l'isolation.

**4.1.2** L'altitude à laquelle l'équipement peut être utilisé ne doit pas dépasser 2 500 mètres. Si l'équipement est utilisé à une altitude supérieure à 2 500 mètres, il faut tenir compte de la réduction des propriétés diélectriques et de la diminution de l'efficacité du refroidissement par l'air. Dans ce cas, l'utilisateur doit discuter des adaptations nécessaires avec le fournisseur.

**4.1.3** Les plages de température pour l'utilisation et le stockage de l'équipement sont les suivantes :

- a) La température ambiante intérieure doit être comprise entre -5 °C et 40 °C ;
- b) La température de stockage de l'équipement doit être comprise entre -15 °C et 40 °C ;
- c) La moyenne quotidienne de la température ambiante ne doit pas dépasser 35 °C.

**NOTE** Si la température ambiante intérieure dépasse ces plages, l'utilisateur doit en informer le fournisseur pour discuter des mesures appropriées.

**4.1.4** L'humidité relative moyenne maximale mensuelle du site où l'équipement est utilisé ne doit pas dépasser 90 % (sans condensation) pendant le mois le plus humide de l'année, et la température minimale moyenne mensuelle ne doit pas dépasser 25 °C pendant ce même mois.

**4.1.5** Des mesures spécifiques doivent être prise pour protéger l'équipement de la poussière, lesquelles doivent être adaptées au site d'installation. Il est particulièrement important de prendre des mesures temporaires de protection contre la poussière au début de la construction et lors de la mise en service progressive de l'unité de contrôle locale. Les paramètres de poussière de référence sont les suivants : la quantité de poussière dont la taille de grain est supérieure à 0,5 micromètre ( $\mu$ ) doit être inférieure à 18 000 grains par litre.

**4.1.6** L'équipement du système doit pouvoir supporter les vibrations suivantes :

- a) L'équipement doit être capable de supporter des vibrations sans que l'accélération ne dépasse 10 mètres par seconde carré ( $m/s^2$ ), lorsque la fréquence de vibration de l'équipement est comprise entre 10 Hz et 500 Hz ;

- b) Des précautions supplémentaires doivent être prises en compte dans la conception et la structure de l'équipement s'il est destiné à être utilisé dans des régions où les tremblements de terre sont fréquents.

## 4.2 Conditions d'alimentation électrique

Le système d'excitation à redresseur statique et ses dispositifs connexes doivent garantir que le générateur fonctionne de façon continue et stable sur le long terme, tout en respectant les conditions de travail standard. Cette garantie est valable pour toute la gamme de tensions et de fréquences d'alimentation électrique définie ;

- a) Pour un système d'alimentation en courant alternatif de 380(415)/220 volts, l'équipement doit être capable de fonctionner correctement même si la tension varie de -15 % à +10 % par rapport à la valeur nominale. La fréquence de ce système d'alimentation peut varier de  $\pm 10$  % par rapport à sa valeur nominale ;
- b) Pour un système d'alimentation en courant continu de 220/110 volts, l'équipement doit également être capable de fonctionner dans un plage de une variation de tension de -15 % à +10 % par rapport à la valeur nominale.

## 4.3 Autres conditions

Les autres conditions de service spéciales doivent être déterminées par le fournisseur et l'utilisateur par voie de négociation.

# 5 Exigences techniques

## 5.1 Exigences de performance

**5.1.1** Le système d'excitation doit être capable de fonctionner de manière continue lorsque la tension et le courant du champ du générateur sont au maximum à 110 % de leurs valeurs nominales.

**5.1.2** Les exigences relatives à l'amplification de la tension et du courant de forçage du champ pour différentes capacités du système d'excitation sont les suivantes :

- a) Pour une unité de moins de 5 MW ou un système d'excitation sans balais, l'amplification ne doit pas être inférieure à 1,5 ;
- b) Pour une unité de 5 MW à 10 MW, elle doit pas être inférieure à 1,8 ;
- c) Toutes exigences particulières doivent être déterminées par voie de négociation entre le fournisseur et l'utilisateur.

**5.1.3** La force de champ doit être maintenue pour une durée minimum de 10 secondes et ne doit pas dépasser 50 secondes.

**5.1.4** Le temps nécessaire pour que la tension monte à sa valeur cible ne doit pas excéder 0,1 seconde. De même, le temps nécessaire pour que la tension diminue à une valeur inférieure ne doit pas dépasser 0,15 seconde.

**5.1.5** La précision avec laquelle le système d'excitation doit réguler la tension terminale du générateur doit être supérieure à  $\pm 1$  % (dans le cas d'une unité de plus de 5 MW), à  $\pm 2,5$  % (dans le cas d'une unité de 0,5 MW à 5 MW) ou à  $\pm 5$  % (dans le cas d'une unité de moins de 0,5 MW).

**5.1.6** Le réglage de la régulation de tension aux bornes du générateur doit permettre une variation de  $\pm 10$  % autour de la valeur nominale. La plage de cette régulation ne doit pas excéder 1 %, et la caractéristique de régulation doit présenter une bonne linéarité.

**5.1.7** Le système d'excitation doit maintenir la tension du générateur à un niveau stable. Même lorsque la fréquence change de 1 % en mode de fonctionnement sans charge, la variation de la tension ne doit pas excéder  $\pm 0,5$  % de la valeur nominale.

**5.1.8** Le régulateur d'excitation doit permettre une régulation stable et douce de la tension du générateur dans une plage allant de 30 % à 110 % de la tension à vide.

**5.1.9** La vitesse à laquelle la valeur pré-réglée de la tension peut être modifiée est limitée. Elle ne doit pas dépasser (1 % de la tension nominale ( $U_N$ ))/seconde et ne doit pas être inférieure à (0,3 %  $U_N$ )/seconde.

**5.1.10** Le rapport de régulation de tension lors de transitions brèves et le temps de récupération de la tension du système d'excitation doivent satisfaire aux normes suivantes (s'il s'agit d'unités basse tension, la tension nominale doit être de 690 volts ou moins, tandis que s'il s'agit d'unités haute tension, la tension nominale doit être supérieure à 690 volts) :

- a) Rejet soudain de charge : Lorsque le groupe turbo-alternateur subit un rejet soudain de sa charge nominale alors qu'il fonctionne à son facteur de puissance nominal, l'amplification transitoire de la tension qui en résulte (dépassement) doit être conforme aux spécifications suivantes :
  - 1) 20 % pour les unités basse tension ;
  - 2) Pas plus de 15 % de la valeur nominale pour les unités haute tension ;
  - 3) La fréquence d'oscillation de la tension ne doit pas dépasser trois fois ;
  - 4) Le temps nécessaire pour stabiliser la tension ne doit pas excéder 5 secondes ;
- b) Augmentation soudaine de charge : Lorsqu'une charge réactive correspondant à la capacité nominale est appliquée de manière soudaine au groupe turbo-alternateur, la tension transitoire doit être conforme aux valeurs suivantes :
  - 1) Pour les unités basse tension, la baisse transitoire de la tension ne doit pas être inférieure à -20 % de la valeur nominale ;
  - 2) Pour les unités haute tension, la baisse ne doit pas être inférieure à -15 % de la valeur nominale ;

- c) Après un changement soudain de charge (augmentation ou diminution), le temps nécessaire de récupération de la tension ne doit pas dépasser 1,5 seconde en cas d'augmentation et 2,5 secondes en cas de diminution ;
- d) Réponse en escalier : En conditions sans charge, avec une variation de tension de  $\pm 10\%$ , le dépassement de tension ne doit pas excéder 50 % de cette variation. L'oscillation de la tension ne doit pas dépasser deux fois et le temps pour stabiliser la tension ne doit pas excéder 3 secondes ;
- e) Montée de tension à partir de zéro : Si le système d'excitation est activé soudainement, la tension doit passer de zéro à sa valeur nominale dans des conditions sans charge et à une vitesse de rotation proche de la vitesse nominale (entre 95 % et 105 % de celle-ci). Le dépassement de tension ne doit pas excéder 10 % de la valeur nominale. La fréquence d'oscillation ne doit pas dépasser trois fois. Le temps pour atteindre la tension nominale ne doit pas excéder 5 secondes. la vitesse nominale, le dépassement de la tension ne doit pas être supérieur à 10 % de la tension nominale, la fréquence d'oscillation ne doit pas être supérieure à trois fois et le temps de régulation ne doit pas être supérieur à 5 secondes.

**5.1.11** Le système d'excitation doit pouvoir fonctionner dans les différentes conditions d'alimentation électrique suivantes :

- a) Plage de tension : Le système d'excitation doit rester fonctionnel lorsque la tension de l'alimentation électrique en courant alternatif fluctue entre 70 % et 130 % de la valeur normale, pendant de courtes périodes ne dépassant pas la durée pendant laquelle la force de champ est appliquée. Si la fluctuation de la tension opérationnelle excède cette plage, une alimentation électrique de secours doit être utilisée pour assurer le respect de cette exigence ;
- b) Plage de fréquence : Le système d'excitation doit pouvoir fonctionner normalement lorsque la fréquence aux bornes du générateur se situe entre 45 Hz et 70 Hz.

**5.1.12** Le système d'excitation doit être conçu pour gérer les surtensions potentielles dans le circuit d'excitation du rotor du générateur. Il est essentiel de s'assurer que la valeur instantanée de la tension au bornier de sortie de l'enroulement de champ magnétique ne dépasse pas 65 % du pic de tension d'essai, comme défini au point 5.1.16.

**5.1.13** Les méthodes d'initiation de l'excitation comprennent l'initiation de l'excitation avec la tension résiduelle et l'initiation de l'excitation par excitation séparée :

- a) Initiation de l'excitation avec la tension résiduelle : L'excitation est initiée de manière fiable lorsque la tension résiduelle aux bornes du générateur est supérieure à 2 % de sa valeur nominale ;
- b) Initiation de l'excitation par excitation séparée : Dans ce cas, l'alimentation électrique utilisée pour initier l'excitation avec un redresseur statique ne doit pas avoir une capacité supérieure à 10 % du courant d'excitation à vide du groupe turbo-alternateur.

**5.1.14** À l'exception des petits systèmes d'excitation pour groupe turbo-alternateur qui réalisent la désexcitation en s'arrêtant, tous les autres systèmes d'excitation doivent être équipés d'une capacité de désexcitation fiable.

**5.1.15** Les équipements d'excitation qui utilisent un refroidissement forcé (à l'exception des excitatrices rotatives) doivent avoir un niveau de bruit mesuré à 1 mètre de l'armoire qui ne dépasse pas 80 dB(A).

**5.1.16** Le test de tenue en tension doit répondre aux exigences suivantes :

- a) Les circuits électriques du système d'excitation doivent passer le test de tenue en tension sans que l'isolation ne soit compromise.
- b) Pour les circuits connectés directement à l'enroulement de champ magnétique ou via un redresseur (à l'exception des machines électriques rotatives), la tension d'essai doit être 10 fois la tension de champ nominale, et au moins 1 500 V pour les générateurs avec une tension de champ nominale de 500 V ou moins. Pour les circuits non directement connectés à l'enroulement de champ magnétique, la tension d'essai doit être de 1 000 V lorsque la tension nominale est de 60 V ou moins, et de deux fois la tension nominale plus 1 000 V (mais pas moins de 1 500 V) pour les tensions nominales supérieures à 60 V.
- c) Pour les tests d'acceptation sur site réalisés dans les centrales hydroélectriques, la tension d'essai doit être de 75 % de la tension d'essai spécifiée. Pour les tests répétés ou après réparation, la tension d'essai doit être de 65 % de la tension spécifiée.
- d) La tension d'essai doit être une valeur efficace de la fréquence du courant alternatif sinusoïdal. Sa forme d'onde doit être proche d'une onde sinusoïdale et la durée du test doit être de 60 secondes.

**5.1.17** La structure métallique du système d'excitation autonome doit être équipée d'une borne de mise à la terre, clairement identifiée avec un symbole  $\oplus$ . Cette borne de mise à la terre ne doit pas être utilisée pour d'autres fonctions.

## **5.2 Exigences fonctionnelles du système**

**5.2.1** Les fonctions de base du régulateur d'excitation sont les suivantes :

- a) Les unités de plus de 5 MW peuvent avoir deux canaux de régulation : soit deux canaux automatiques, soit un automatique et un manuel, offrant ainsi une redondance. Chacun des deux canaux de régulation doit servir de secours à l'autre et ils doivent être capables de se suivre mutuellement. Ils doivent également permettre un basculement, soit automatique, soit manuel, entre eux. Pendant ce basculement, il est essentiel que ni la tension aux bornes du turbo-alternateur ni la puissance réactive ne subissent de fluctuations significatives ;
- b) Le régulateur d'excitation basé sur un micro-ordinateur doit pouvoir communiquer avec un ordinateur principal, généralement par une connexion point à point ;

- c) Fonctionnement local et à distance ;
- d) Limite de surexcitation ;
- e) Limite de sous-excitation ;
- f) Limite V/F (optionnelle) ;
- g) Régulation différentielle ;
- h) Mise en marche manuelle/automatique de l'excitation ;
- i) Fonction de suivi de la tension du réseau ;
- j) Conformité aux exigences de base du système de surveillance ;
- k) Fonction PSS (optionnelle) ;
- l) Prévoir un système de contrôle VAR ou PF pour les régulateurs d'excitation basés sur micro-ordinateur (optionnel).

**5.2.2** Le redresseur de puissance du système d'excitation doit avoir les fonctions suivantes :

- a) Le ventilateur de refroidissement doit être doté d'une fonction de commutation automatique et d'une fonction d'alarme pour signaler l'arrêt du ventilateur ;
- b) Le système doit être capable de détecter et d'alerter en cas de défaillance d'un fusible rapide ;
- c) Le système doit pouvoir détecter et signaler la perte de signaux d'impulsion dans le système.

**5.2.3** L'équipement de désexcitation doit répondre aux exigences suivantes :

- a) Pour les unités de moins de 5 MW ou avec un courant d'excitation inférieur à 500 A, une méthode de désexcitation linéaire doit être employée ;
- b) Le système d'excitation doit offrir un point de connexion pour permettre le déclenchement par dérivation du disjoncteur à la sortie du turbo-alternateur, en cas de déclenchement accidentel de l'interrupteur de désexcitation pendant le fonctionnement connecté au réseau.

**5.2.4** La protection contre les surtensions du rotor doit répondre aux exigences suivantes :

- a) Les unités ayant une capacité supérieure à 5 MW ou un courant d'excitation de plus de 300 A doivent être équipées d'une protection contre la surtension de l'enroulement d'excitation ;

- b) La protection contre la surtension pour les points électroniques à branche unique ne doit pas être connectée en série avec un fusible.

**5.2.5** Le système doit inclure les principales fonctions de détection suivantes : la détection de l'impulsion de déclenchement, la détection du circuit synchrone du régulateur d'excitation, la détection de la déconnexion du transformateur de tension, la détection du fusible rapide du redresseur de puissance et la détection de la défaillance du canal de régulation.

**5.2.6** Le système d'excitation doit pouvoir émettre les signaux suivants :

- a) Perte ou défaut de l'alimentation électrique régulée du régulateur ;
- b) Défaut du canal du régulateur ;
- c) Perte de l'alimentation électrique pour le circuit de commande opérationnelle du système d'excitation ;
- d) Défaut de l'armoire du redresseur de puissance ;
- e) Action du limiteur d'excitation ;
- f) Déconnexion du transformateur de tension.

**5.2.7** Le système d'excitation doit être équipé de manière à pouvoir afficher le niveau de courant d'excitation actuel, la tension de champ et la tension aux bornes du générateur.

### **5.3 Autres exigences techniques**

**5.3.1** Le transformateur d'excitation doit répondre aux exigences suivantes :

- a) Ni un interrupteur automatique ni un fusible rapide ne doivent être installés sur le côté haute tension du transformateur d'excitation ;
- b) La différence entre les tensions des trois phases du transformateur d'excitation ne doit pas excéder 5 % ;
- c) Des mesures de blindage et de mise à la terre doivent être appliquées entre les enroulements primaire et secondaire du transformateur ;
- d) L'impédance de court-circuit du transformateur d'excitation doit être comprise entre 4 et 8 % ;
- e) Le transformateur d'excitation triphasé doit avoir un groupe de câblage de type Y/d.

**5.3.2** Les transformateurs de tension et de courant doivent satisfaire aux exigences opérationnelles du système d'excitation et leur niveau de précision ne doit pas être inférieur à 0,5.

**5.3.3** Les niveaux de protection requis pour les différents composants du système d'excitation sont les suivants :

- a) Le niveau de protection de l'armoire du régulateur d'excitation doit être supérieur à IP30 ;
- b) Le niveau de protection de l'armoire du redresseur de puissance d'excitation doit être supérieur à IP20 ;
- c) L'enceinte du transformateur d'excitation installé à l'intérieur doit également avoir un niveau de protection supérieur à IP20.

## **6 Portée de la commande d'équipements et de pièces de rechange**

### **6.1 Portée de la commande**

**6.1.1** Le dispositif d'excitation doit inclure des unités ou des boucles pour la régulation de contrôle, le redressement de puissance et la protection de désexcitation.

**6.1.2** Les équipements additionnels à fournir doivent être convenus entre le fournisseur et l'utilisateur en fonction des exigences spécifiques de la commande.

### **6.2 Pièces de rechange**

Le fournisseur doit fournir les pièces de rechange nécessaires pour les composants susceptibles de s'endommager. S'agissant des composants du redresseur de puissance et des fusibles rapides, la quantité de pièces de rechange fournies doit représenter au moins 30 % de la quantité utilisée. La fourniture et la quantité des autres pièces de rechange doivent être déterminées par des négociations entre le fournisseur et l'utilisateur.

## **7 Documents techniques**

Le fournisseur doit fournir à l'utilisateur les documents techniques suivants :

- a) Spécifications techniques du système d'excitation ;
- b) Instructions d'utilisation ;
- c) Rapport de test de livraison et certificat de conformité ;
- d) Instructions pour le débogage et l'ajustement du système ;
- e) Schéma du système et diagramme schématique de fonctionnement ;



- f) Liste des principales pièces et schéma de câblage du panneau/de l'armoire ;
- g) Images et plans montrant l'aspect extérieur de l'équipement et les détails d'installation ;
- h) Inventaire des articles livrés ;
- i) Données techniques des produits sous-traités ;
- g) Autres données techniques nécessaires pour l'installation, l'utilisation et l'entretien du système.

## **8 Essais**

### **8.1 Essais de livraison**

Les essais suivants doivent être effectués avant la livraison :

- a) Ces essais doivent être conformes aux spécifications listées dans le tableau A.1 ;
- b) En plus des essais standards, d'autres tests peuvent être nécessaires, lesquels seront convenus entre le fournisseur et l'utilisateur.

### **8.2 Essais sur site**

Une fois le système installé sur le site de l'utilisateur, les tests supplémentaires suivants doivent être réalisés :

- a) Ces essais standards sur site doivent être conformes aux spécifications du tableau A.1 ;
- b) En plus des essais standards, d'autres tests peuvent être nécessaires, lesquels seront convenus entre le fournisseur et l'utilisateur.

### **8.3 Essais de type**

Ces essais sont nécessaires lorsque de nouveaux équipements sont produits pour la première fois ou lorsque des modifications significatives sont apportées à des équipements existants, et que ces changements pourraient influencer les performances du produit. Les éléments à tester sont les suivants :

- a) Mesure de l'amplification de la tension maximale, du rapport de réponse et du temps de réponse du système d'excitation ;
- b) Mesure de la plage de réglage de la tension aux bornes du générateur synchrone ;
- c) Mesure du rapport de régulation de tension en état stable ;

- d) Mesure du rapport de régulation de tension ;
- e) Mesure de la plage de réglage de l'unité de commande manuelle ;
- f) Tests en cas d'augmentation soudaine de charge et de rejet soudain de charge ;
- g) Test du basculement automatique/manuel ;
- h) Essai de l'établissement de la tension nominale ;
- i) Tests de fonctionnement et de fiabilité du système d'excitation sous différentes tensions (continue, alternative) et fréquences de commande ;
- j) Test de désexcitation ;
- k) Test du courant nominal de l'installation de redressement ;
- l) Mesure du bruit de l'équipement d'excitation ;
- m) Test des températures ambiantes maximale et minimale ;
- n) Test d'opération d'essai ;
- o) Réalisation de tous les éléments des essais de livraison.

## **9 Plaque signalétique, emballage, transport et stockage**

### **9.1 Plaque signalétique**

Les matériaux et la méthode de gravure des plaques signalétiques doivent garantir que les informations inscrites restent lisibles pendant toute la durée de vie de l'équipement. Les éléments d'information à faire figurer sur la plaque sont les suivants :

nom du fournisseur, nom et modèle de l'équipement ; tension de sortie nominale et courant de sortie nominal ; alimentation de commande opérationnelle ; numéro de produit et date de livraison.

### **9.2 Emballage**

**9.2.1** L'emballage doit être convenu entre le fournisseur et l'utilisateur. Si l'équipement a des exigences particulières, celles-ci doivent être clairement indiquées sur le conteneur d'emballage.

**9.2.2** Le produit doit être protégé par des emballages interne et externe. Les boîtes enfichables doivent être solidement verrouillées et attachées. Les conteneurs d'emballage doivent inclure des mesures contre la poussière, contre la pluie et contre les vibrations. Enfin, des dispositifs pour le levage et des marquages doivent être prévus pour faciliter la manutention et le transport.

**9.2.3** Les inspections de produits avant emballage doit être réalisées comme suit :

- a) Il faut vérifier si tous les accessoires, les pièces de rechange, le certificat de conformité et les documents techniques pertinents du produit sont présents et complets ;
- b) Il est également important de vérifier l'apparence du produit afin de s'assurer qu'il n'y a pas de dommages.

**9.2.4** L'emballage des produits destinés à l'exportation doit être conforme aux normes et réglementations nationales en matière d'inspection et de quarantaine.

**9.2.5** La garantie sur l'emballage ne doit pas excéder 12 mois à compter de la date de livraison du produit.

### **9.3 Transport**

Le fournisseur et l'utilisateur doivent spécifier les moyens de transport adaptés à l'équipement, ainsi que les exigences spécifiques relatives au transport. Le transport et la manutention des produits doivent être réalisés conformément aux instructions et aux marques figurant sur les conteneurs d'emballage.

### **9.4 Stockage**

**9.4.1** Les produits doivent être stockés dans des entrepôts à l'abri de la poussière et de la pluie, à une température ambiante comprise entre -25 °C et +55 °C. L'humidité relative dans l'entrepôt ne doit pas dépasser 85 %, et l'entrepôt ne doit pas contenir d'acide, d'alcali, de sel, de gaz corrosifs ou explosifs, ni être soumis à un champ électromagnétique fort.

**9.4.2** Le fournisseur doit garantir, à compter de la date de livraison, que les produits resteront exempts de corrosion et ne verront pas leur précision réduite en raison d'un emballage inapproprié pendant une période de 12 mois. Cette garantie est valable dans les conditions de stockage spécifiées au point 4.1.

## **10 Installation, fonctionnement et maintenance**

### **10.1 Installation**

L'installation du produit doit être effectuée par des professionnels compétents qui possèdent à la fois l'expérience et les qualifications nécessaires.

### **10.2 Fonctionnement et maintenance**

**10.2.1** Avant que l'équipement ne soit mis en service de manière formelle, des tests appropriés doivent être réalisés afin de s'assurer qu'il répond à toutes les exigences spécifiées.

**10.2.2** Le fonctionnement et la maintenance de l'équipement doivent être conformes aux normes de référence, aux instructions fournies par le fournisseur, ainsi qu'aux spécifications opérationnelles spécifiques à la centrale hydroélectrique.

**10.2.3** Le fournisseur doit offrir un soutien technique pour résoudre tout problème qui pourrait survenir pendant l'installation, l'utilisation et la maintenance de l'équipement. Il doit également fournir une formation au personnel de l'utilisateur sur l'installation, l'utilisation et la maintenance de l'équipement.

## **11 Période de garantie de la qualité**

La garantie est valable à condition que le produit soit correctement stocké, installé et utilisé. La période de garantie est d'un an à compter de la date d'achèvement de l'essai de fonctionnement de 72 heures, ou de deux ans après la date de livraison du dernier lot de marchandises ; la date la plus proche étant retenue. Si, pendant la période de garantie de qualité, l'équipement est endommagé ou ne fonctionne pas correctement en raison de problèmes liés à la qualité de fabrication, le fournisseur est tenu de le réparer ou de le remplacer gratuitement.

**Annexe A**  
**(Informative)**

**Inspection et test d'acceptation sur site**

**Tableau A.1 Éléments d'inspection en usine et de test d'acceptation sur site**

No	Éléments de test	Inspection en usine	Acceptation sur site
1	Test du transformateur d'excitation	✓	✓
2	Test du disjoncteur de champ magnétique	✓	✓
3	Test du redresseur de puissance	✓	✓
4	Test de la résistance non linéaire	✓	✓
5	Test du pont électronique à thyristors	✓	✓
6	Mesure d'isolation et test diélectrique des différents composants du système d'excitation	✓	✓
7	Test des unités de base et des unités auxiliaires du régulateur automatique d'excitation	✓	✓
8	Test caractéristique statique total du régulateur automatique d'excitation	✓	✓
9	Tests en boucle pour l'utilisation, la protection, la surveillance, le signal et le port du système d'excitation	✓	✓
10	Test de l'initiation de l'excitation, de la montée en pression, de la baisse de pression et des caractéristiques de dépression du champ de conversion		✓
11	Mesure de la plage de réglage de la tension et de la vitesse de variation de la tension pré-réglée dans les différents canaux de régulation du régulateur automatique d'excitation.		✓
12	Mesure et enregistrement des caractéristiques tension-fréquence du générateur avec le régulateur automatique d'excitation		✓
13	Test de basculement des modes automatique/manuel et des deux ensembles de canaux de régulation automatique	✓	✓
14	Test de la plage de régulation de l'unité de commande manuelle	✓	✓
15	Tests de réponse en escalier de 5 % ou 10 % sans charge du générateur		✓
16	Détection du système de refroidissement de l'armoire de puissance redressée	✓	✓
17	Test de bruit	✓	✓
18	Test de partage de courant de l'unité de puissance du système d'excitation	✓	✓
19	Mesure du rapport de régulation de tension du générateur avec le régulateur automatique d'excitation		✓
20	Test du réglage de la charge réactive et du rejet de charge du générateur		✓
21	Test de désexcitation du générateur dans les conditions sans charge et de travail nominales		✓
22	Détection de l'élévation de température de toutes les parties du système d'excitation		✓

**Tableau A.1** (suite)

No	Éléments de test	Inspection en usine	Acceptation sur site
23	Tests de réglage et de correction d'action pour les unités de fonction auxiliaires et les unités de protection/détection	✓	✓
24	Test de courant continu de 12 heures de l'appareil d'excitation dans des conditions de basse tension et de courant élevé	✓	
25	Opération d'essai continu de 72 heures du système d'excitation dans les conditions de travail nominales		✓

---