



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Rapport annuel du 27. Novembre 2013

Méthodes de mesure pour la détermination normalisée des pertes et du rendement d'entraînements électriques de haute efficacité énergétique

Joint Research Work with Australia

Mandant:

Office fédéral de l'énergie OFEN
Programme de recherche Technologies et utilisations de l'électricité
CH-3003 Berne
www.ofen.admin.ch

Cofinancement:

EPFL, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, CH-1015 Lausanne

Mandataire:

Laboratoire de Machines Electriques (LME)
EPFL-STI-IEL
Station 11
CH-1015 Lausanne
<http://lme.epfl.ch>

Auteur:

Roland Wetter, EPFL, roland.wetter@epfl.ch

Responsable de domaine de l'OFEN:	Dr. Michael Moser
Chef du programme de l'OFEN:	Roland Brüniger
Numéro du contrat de l'OFEN:	SI/500500749-01

Les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions de ce rapport.

Contexte et objectifs

La réglementation, par des normes contraignantes, du rendement minimum des moteurs électriques, nécessite de disposer d'outils de mesure, tant pour la détermination que pour la vérification de la valeur du rendement. La connaissance précise du rendement est aujourd'hui aussi une nécessité pour l'évaluation des coûts du cycle de vie (CCV / LCC - Life Cycle Cost).

Les essais à entreprendre doivent premièrement conduire à un résultat d'une bonne précision. Deuxièmement, la reproductibilité des essais doit être assurée, ceci tant pour la méthode que pour le résultat. Pour atteindre ce double objectif, les méthodes de mesure doivent être détaillées par des normes internationalement reconnues. La description des procédures de mesure doit être claire et sans équivoque, ne laissant subsister ni interprétation, ni prêter le flanc à la contestation.

On observe, par ailleurs, la mise en œuvre de plus en plus fréquente d'entraînements électriques à vitesse variable. Dans ce cas, les moteurs utilisés, aussi bien synchrones qu'asynchrones, sont alimentés par le biais d'un variateur de fréquence.

Ces considérations, et d'autres encore, conduisent à de nouvelles exigences pour la définition du rendement ; on mentionnera plus particulièrement :

- en raison de l'opérabilité à des vitesses et charges variables, il est nécessaire d'établir des caractéristiques de rendement en fonction non seulement de la charge, mais également de la vitesse ;
- pour certains entraînements, le moteur ne peut être dissocié de son alimentation spécifique ; le rendement ne peut donc être déterminé que pour l'entraînement dans sa globalité ;
- l'alimentation par variateurs de fréquence produit dans les moteurs des pertes supplémentaires en charge (cuivre et fer) ; la détermination précise de ces pertes supplémentaires est particulièrement délicate.

Le but de ce projet est le développement de méthodes de mesure originales et innovantes permettant la détermination précise et reproductible du rendement des entraînements à vitesse variable.

Travaux réalisés et résultats obtenus

Cadre de travail

Les tâches originellement dévolues à ce projet consistaient dans la définition de méthodes particulières d'essai, avec l'objectif d'en améliorer les processus et leurs descriptifs. L'année 2013 a mis en évidence que le domaine de la mesure du rendement mérite une approche de fond.

Plusieurs éléments ont motivé ce choix ; il s'agit plus particulièrement de :

- la problématique de la mesure directe en terme de conditions d'essai, d'incertitude et de reproductibilité ;
- l'influence du convertisseur de fréquence sur les caractéristiques de rendement du moteur ;
- la nécessité d'avoir une meilleure connaissance des dispersions de mesure ; la distinction entre les incertitudes de mesure et les dispersions de fabrication devient d'autant plus nécessaire que le rendement est élevé.

Domaines abordés dans le projet et premiers résultats

Nous avons structuré le projet en quatre domaines : analyse, recherche, tests, conceptualisation (fig. 1).

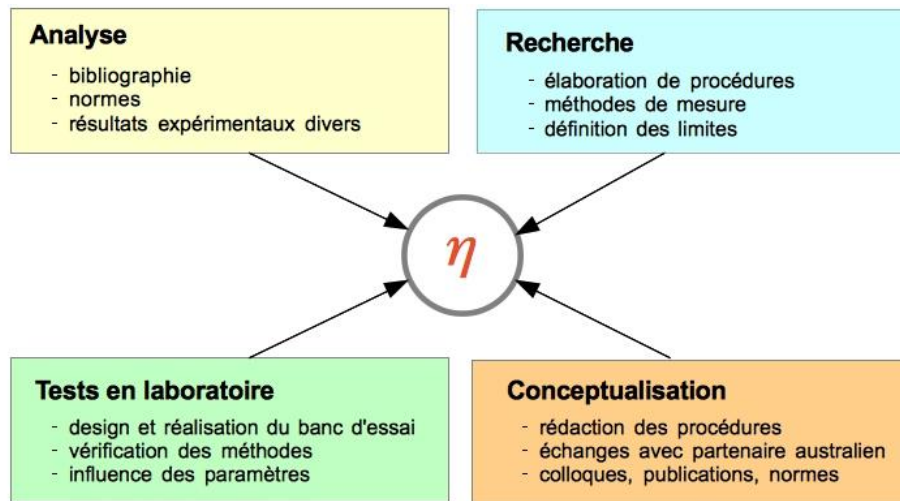


Figure 1. Vue synoptique du projet.

1. Analyse

La recherche bibliographique a permis de trouver plusieurs publications (issues principalement de milieux académiques) qui traitent de la problématique des pertes supplémentaires. La question de la sensibilité de la précision selon les méthodes de mesure est aussi documentée.

La bibliographie met aussi en évidence que la mesure du rendement des moteurs alimentés par un variateur de fréquence préoccupe les milieux concernés depuis de nombreuses années.

Les normes existantes ont aussi été plus précisément analysées. Il s'agit pour l'essentiel des normes de la série IEC 60034. Leur analyse nous a conduit à la constatation que les procédures de mesure normalisées reposent sur une lente évolution et une large expérience provenant de nombreuses sources.

Elles font appel à des méthodes de mesure relativement simples, avec une certaine économie de moyens. En terme de précision de la valeur de rendement, la norme IEC 60034-2-1 (Machines électriques tournantes – Partie 2-1 : Méthodes normalisées pour la détermination des pertes et du rendement à partir d'essais) reste cependant particulièrement évasive.

2. Recherche

Mesure par la méthode directe

La difficulté de mesurer précisément les pertes supplémentaires en charge d'un entraînement alimenté par un variateur de fréquence a conduit à préconiser la solution de mesure selon la méthode directe en charge, comme méthode préférentielle. Ce procédé de détermination du rendement est certainement le plus efficace dans sa mise en œuvre. Il trouve cependant ses limites dans la précision du résultat. Plus le rendement est élevé, plus l'incertitude devient importante. Cette méthode requiert non seulement un appareillage de haute précision, mais de plus, il doit être utilisé uniquement dans sa plage d'erreur la plus faible.

Mesure par la méthode indirecte

Dans le cas des entraînements par variateur de fréquence, la variante de mesure par la méthode indirecte par sommation des pertes séparées, comporte une incertitude difficilement évaluable en raison de l'inconnue que représentent les pertes supplémentaires en charge.

Cette méthode indirecte possède cependant des avantages nombreux : économie de moyens au niveau des équipements et de l'appareillage, tests ne nécessitant pas de longue stabilisation en température, pas de montages mécaniques délicats.

Avec raison, la norme IEC 60034-2-1 évalue l'incertitude de cette méthode comme moyenne à élevée. En effet, les pertes supplémentaires ne sont pas mesurées mais estimées. Ceci conduit forcément à une appréciation très sommaire de leur valeur. Le manque de rigueur de cette estimation devient alors flagrant pour les entraînements alimentés par un variateur de fréquence.

Compte tenu de ses nombreux avantages, la méthode indirecte mérite cependant d'être améliorée. Cela signifie élaborer des procédures de détermination, efficaces et précises des pertes supplémentaires. Rappelons que la norme IEC 60034-2-1 propose cinq méthodes de détermination des pertes supplémentaires, mais aucune d'entre elles n'est vraiment satisfaisante.

Orientation de la recherche

L'orientation de nos investigations permettant de définir des essais probants de la mesure des pertes supplémentaires s'appuie sur des capacités instrumentales et de dépouillement qui sont aujourd'hui devenues usuelles, mais onéreuses et délicates il y a encore une décennie.

En effet, l'évolution fulgurante de dispositifs d'acquisition et de traitement des données liés à des processeurs dédiés, permet d'imaginer des solutions de détermination des grandeurs par des méthodes mixtes, à savoir des mesures liées à des processus de calcul spécifiques. Plusieurs pistes sont actuellement en cours d'examen. L'objectif prioritaire reste d'élaborer des méthodes simples, non invasives, ne nécessitant qu'un équipement modeste, tout en assurant une bonne précision.

Pour corroborer la pertinence des méthodes, la vérification des résultats par la méthode directe nous semblait aussi indispensable. Ce choix nous a conduit à élaborer un banc d'essai de haute précision mécanique (cf. pt. 3 infra).

3. Tests en laboratoire

Généralités

Pour la mesure du rendement des moteurs d'une puissance supérieure à 2 kW, nos équipements de laboratoire étaient conçus essentiellement pour la méthode indirecte par sommation des pertes. Réaliser un stand d'essai apte à la mesure de rendement par la méthode directe ne pouvait se faire par l'évolution des équipements existants. Un concept neuf a dû être élaboré. Ce nouveau stand poursuit plusieurs objectifs, plus particulièrement :

- l'investigation des limites de la mesure par la méthode directe ;
- le test comparatif des méthodes ;
- la définition des exigences mécaniques d'une bonne mesure du couple ;
- la réalisation d'essais non conventionnels ;
- la vérification de la pertinence des concepts et leurs limites ;
- l'évaluation pratique des tolérances de montage.

Banc de test

Le défi mécanique principal d'un banc de mesure de rendement par la méthode directe est l'ajustement précis de la ligne d'arbre dans laquelle est inséré le capteur de couple. La mesure précise du couple exige de minimiser autant que faire se peut les forces parasites axiales et radiales qui faussent la mesure. L'insertion d'un accouplement élastique permet certes la compensation, dans certaines limites, d'un mésalignement, mais ne supprime pas totalement les forces parasites.

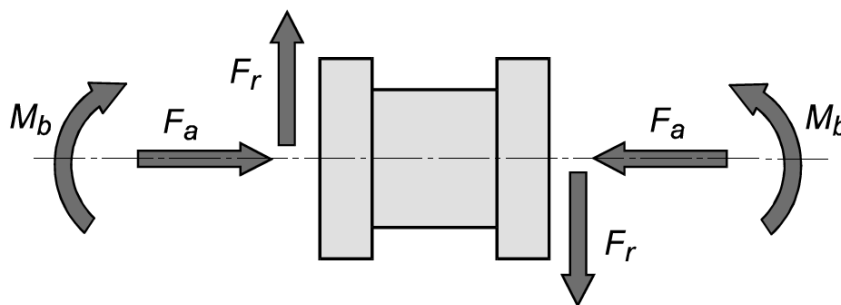


Figure 2. Efforts et couples parasites pouvant s'exercer sur le capteur de couple (source : HBM).

Réalisation

La conception du banc d'essai a été réalisée avec le concours indispensable et précieux d'un mécanicien designer expérimenté. Ce banc permet un alignement extrêmement précis de la ligne d'arbre (tolérance inférieure à 0.05 mm).

Ce banc n'est pas réalisé dans un but de production, mais comme outil de recherche. Les concepts retenus sont donc basés sur des principes de réalisation relativement élémentaires, mais garantissant la précision désirée.

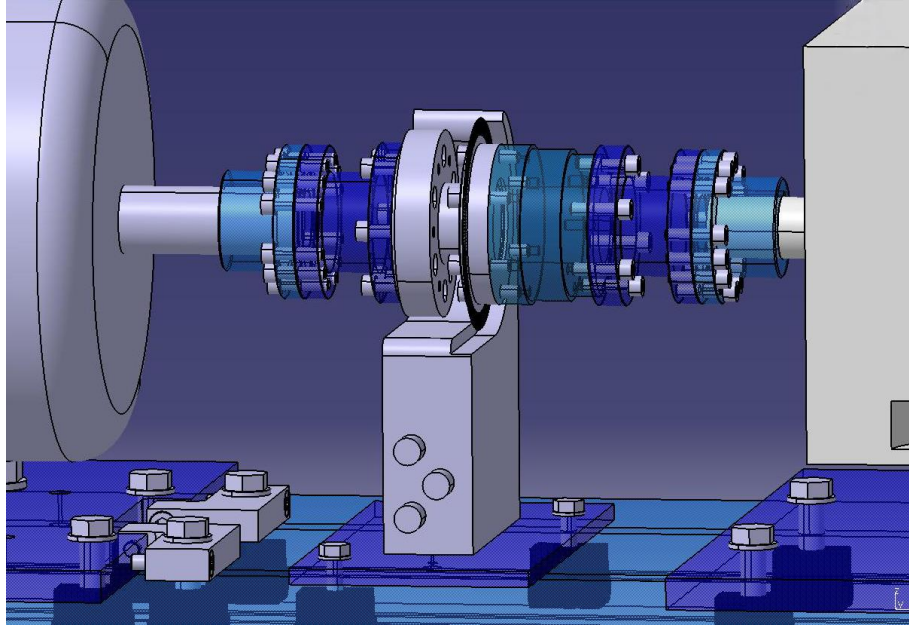


Figure 3. *Vue générale du dispositif d'accouplement, avec au centre, le capteur de couple.*

Appareillage de mesure

Pour atteindre des précisions de mesure élevées, on ne peut faire l'économie d'une instrumentation performante. Pour l'alignement de la ligne d'arbre, nous utilisons un dispositif de réglage par laser. Le capteur de couple, associé à un accouplement à lame, est d'une classe de précision de 0.03. La mesure de puissance est réalisée avec un analyseur de puissance spécifique. Comme déjà mentionné, d'autres équipements de mesure sont à l'étude.

4. Conceptualisation

Normes

En ce qui concerne l'évolution des normes, nous relèverons que la première édition de la norme IEC 60034-2 remonte à 1955. Elle a subi des compléments et amendements en 1972, 1995 et 1996. Elle est refondue en 2007 pour devenir la norme 60034-2-1. Une seconde édition est en cours de préparation.

Cette norme IEC actuellement en vigueur est quasi muette au sujet de la précision de la mesure. Elle mentionne tout au plus passim une classe de précision des appareils. Mais se limiter à la désignation d'une classe de précision est insuffisant car, d'une part, elle s'applique mal aux appareils digitaux modernes, et d'autre part elle occulte la précision effective de la mesure.

Le renvoi à la norme IEC 60051-1 pour l'appareillage de mesure n'est en fait vraiment pertinent que pour l'appareillage analogique.

On peut dès lors comprendre que des mesures de rendement réalisées conformément à la norme IEC 60034-2-1 ne peuvent pas, stricto sensu, conduire à un résultat uniforme.

Déclaration du rendement

Dans les notices techniques des moteurs commercialisés, les valeurs de rendement ne sont jamais chiffrées avec une marge d'incertitude. La méthode de mesure utilisée n'est pas non plus indiquée. Lorsque l'on connaît d'une part l'importante «zone grise» de la norme IEC, et d'autre part la dispersion non négligeable des pertes fer effectives, on peut comprendre que les valeurs de rendement auto déclarées soient sujettes à caution. Dans la mesure où le marché du moteur est réglementé par des standards de rendement normalisé, l'imprécision des valeurs déclarées pose un problème en termes d'information juste du client et aussi de loyauté face à la concurrence.

Collaboration au niveau international

Partenariat : laboratoire *Ca/Test*, Port Elliot, South Australia, Mr Andrew Baghurst. La partie australienne du projet est subventionnée par le *Department of Climate Change and Energy Efficiency, Australia*.

Contribution australienne

La contribution australienne se concentre principalement sur les procédés en lien avec la mesure selon la méthode directe. Rappelons que *Ca/Test* est une entreprise privée, dont l'activité principale consiste en prestations rémunérées de tests de moteurs pour des tiers. De ce fait, la préoccupation de notre partenaire est axée prioritairement sur l'amélioration de la précision des processus de caractère productif. Les contributions australiennes sont donc des propositions d'amélioration globales et pragmatiques des normes sous le rapport des imprécisions et omissions descriptives.

Contribution suisse

Nos propres travaux se déroulent dans le cadre d'une institution polytechnique, dont la particularité est la double mission de l'enseignement et de la recherche. Les travaux que nous menons sont donc axés principalement sur une contribution de fond, dans une perspective de recherche moins orientée, dans une première étape du moins, sur des considérations de facilité productives des solutions envisagées.

Partenariat

L'intérêt majeur du partenariat réside dans la spécificité propre de chacune des contributions qui n'empiète nullement sur celle de l'autre. Il y a là une complémentarité des plus utiles.

Evaluation 2013 et perspectives 2014

Résumé des principales avancées réalisées en 2013

L'année sous revue a permis de

- mettre en évidence les lacunes normatives ;
- de jalonner, par les expériences recueillies dans la bibliographie, les écueils et les limites de nos propres projets ;
- la réalisation d'un banc de mesure de haute précision ;
- la mise en œuvre d'un appareillage de mesure moderne.

Perspectives 2014

Les travaux planifiés pour 2014 seront axés principalement sur l'élaboration de procédures de mesures et les vérifications expérimentales y afférentes. Nous formulerons également les premiers descriptifs des procédures les plus prometteuses.