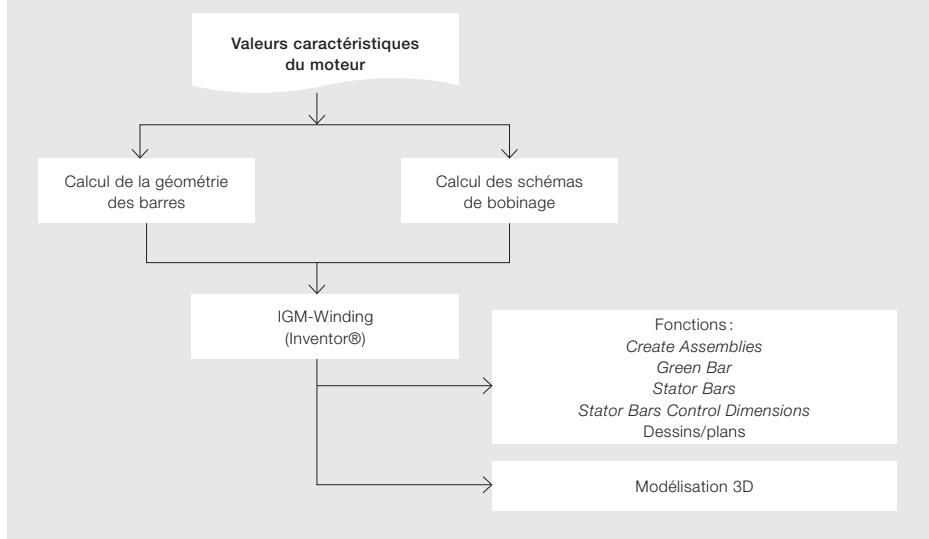


Fiabilité en 3D

Concevoir des schémas de bobinage en quelques clics

MACARENA MONTENEGRO-URTASUN, GIOVANNI CANAL,
JAN POLAND, AXEL FUERST – Les entraînements de broyeur
sans réducteur sont des machines spéciales aux spéci-
fications imposées par le client. Selon l'IEEE (*International
Electrical and Electronics Engineers*), 33 % des défail-
lances des moteurs de grosse puissance survenant en
régime normal de fonctionnement sont le fait du bobinage
stator. Le coût des arrêts de production qui en découlent
est exorbitant. L'outil ABB de conception 3D des schémas
de bobinage du stator permet d'analyser dans le détail
chaque solution pour choisir la plus performante en termes
de coûts de fabrication, de simplicité d'installation, de
temps de réparation et de fiabilité.

1 Étapes du processus de conception 3D du bobinage



En 1969, ABB livrait au cimentier Lafarge le tout premier entraînement sans réducteur pour broyeur à boulets au monde, une machine de 6,4 MW. Depuis, les dimensions et la puissance de ces systèmes d'entraînement n'ont cessé d'augmenter, tout comme leur altitude d'installation (plus de 4000 m). Les conditions d'exploitation extrêmement difficiles mettent à mal la durée de vie des entraînements et imposent de concevoir des bobinages de moteur ultraperformants.

Optimiser la conception avec IGM-Winding

Actuellement, les entraînements de broyeur sans réducteur sont conçus par modélisation paramétrique 3D accompagnée de dessins de définition 2D pour la fabrication. Les paramètres sont calculés à partir des caractéristiques du moteur, la création du modèle 3D étant ensuite automatique. La tâche la plus complexe est la conception du bobinage du moteur.

Illustration

Pour les concepteurs de machines électriques, IGM-Winding d'ABB est un remarquable outil d'optimisation des bobinages qui réduit les coûts, accélère l'installation et limite les risques de défaillance, des atouts très appréciés sur les sites isolés.

Sans les bons outils, concevoir et optimiser un bobinage sont quasi impossibles au vu de la somme d'heures nécessaire rien que pour étudier les différents schémas envisageables et minimiser les risques de défaillance du fait de distances dans l'air insuffisantes. L'objectif d'ABB était donc de développer un outil logiciel, baptisé *IGM-Winding*, capable de créer un modèle paramétrique 3D fini (depuis chacune

des barres jusqu'au bobinage complet) permettant d'évaluer et d'optimiser différents schémas de bobinage avant de valider la meilleure exécution. Il devait également permettre d'éditer toute la liasse de dessins optimisés et validés pour la fabrication et, ultérieurement, le contrôle qualité.

Un projet en trois parties

Développé ces deux dernières années, IGM-Winding se compose de trois parties : calcul de la géométrie des barres, calcul des schémas de bobinage et modélisation paramétrique 3D du bobinage. Il édite en sortie les dessins de définition de chacun des éléments du bobinage à fabriquer → 1.

La géométrie des barres stator est calculée par un petit programme à partir des valeurs caractéristiques du moteur.

Les schémas de bobinage et les ponctages sont calculés par un outil ABB → 2a. Les cavaliers peuvent être disposés de différentes manières sans impact sur le schéma électrique retenu → 2b. Une fois

IGM-Winding se compose de trois parties : calcul de la géométrie des barres, calcul des schémas de bobinage et modélisation paramétrique 3D du bobinage.

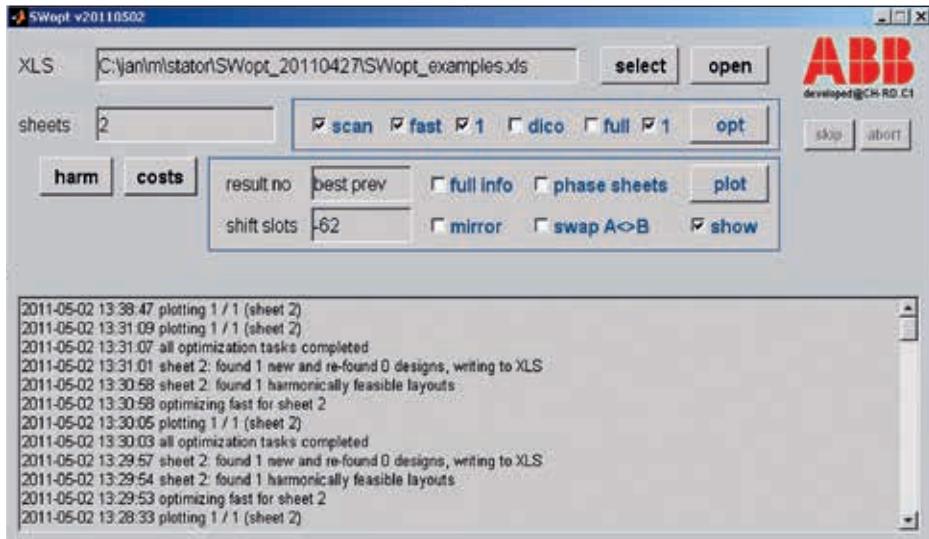
le schéma de bobinage final défini, on dresse la liste des différents types de barres à insérer dans les encoches → 2a.

Enfin, IGM-Winding, implanté dans l'outil de CAO 3D Autodesk Inventor, crée le modèle paramétrique du bobinage et ses éléments à partir des calculs de la géométrie des barres et de schéma de bobinage.

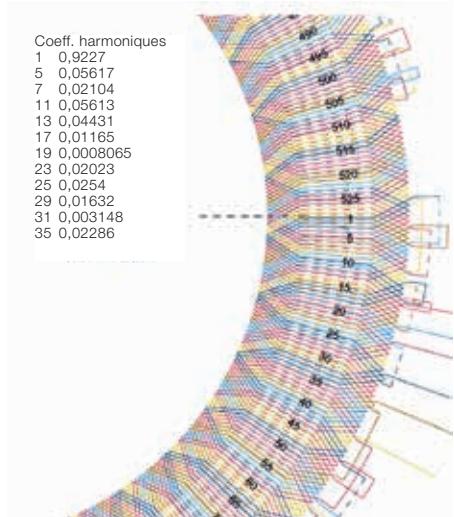
Le meilleur schéma

Le choix du schéma de bobinage est un problème d'optimisation ardu. Sachant que les bobinages fractionnaires – dans lesquels le nombre d'encoches n'est pas un multiple entier du nombre de pôles x le nombre de phases – sont souvent privilégiés pour leurs propriétés harmoniques avantageuses, il est impossible de connecter directement chaque bobine à la bobine voisine. Un schéma de bobinage acceptable doit donc comporter des

2 Outil de conception du bobinage



2a Exemple d'écran



2b Schéma de bobinage créé par l'outil

cavaliers qui relient les extrémités des bobines distantes de quelques encoches. Ces derniers peuvent être positionnés de manière plus ou moins judicieuse, la priorité étant de minimiser la masse de cuivre et les coûts de fabrication. En réalité, le problème posé par chaque phase est un exemple du célèbre problème du voyageur de commerce, très étudié en optimisation mathématique. Il s'agit de trouver le plus court chemin passant une seule fois par chacune des bobines (villes pour le voyageur de commerce) afin de réduire au minimum le coût des connexions (trajet du voyageur). Ce type de problème, difficile à résoudre aujourd'hui, le restera encore longtemps.

Un schéma de bobinage est encore plus complexe car chaque phase pose, à elle seule, un problème du voyageur de commerce et l'interaction des cavaliers ne doit pas être source de conflits. De plus, les champs électriques induits autour des cavaliers s'influencent mutuellement si ces cavaliers sont adjacents; par conséquent, on recherche des influences qui s'annulent les unes des autres au lieu de se renforcer. Outre le positionnement des cavaliers, il faut aussi décider de l'affectation des barres aux trois phases, ce qui se répercute sur les propriétés harmoniques du bobinage.

Pour optimiser un schéma de bobinage, on a recours à des méthodes d'optimisation mathématique très utilisées comme la programmation mixte en nombres entiers et la programmation par contraintes. Si la première a l'avantage

de prendre en compte tous les critères de conception (versions linéarisées pièce par pièce), elle présente l'inconvénient d'utiliser le plus souvent un algorithme par évaluation et séparation progressive (*branch and bound*) sur une arborescence de recherche de solutions dont l'optimisation peut être très gourmande en temps de calcul. En programmation par contraintes, la recherche des meilleurs schémas de bobinage est guidée par les contraintes du problème (conflits géométriques entre les cavaliers). Si elle donne souvent rapidement de très bons résultats, elle ne garantit pas d'optimum global.

Représentation 3D du bobinage

Le processus de conception commence par la création d'un plan d'ensemble 3D, soit un stator complet où toutes les encoches comportent leurs barres supérieure et inférieure. Pour cela, il faut créer un dessin d'ensemble 3D de la barre et de tous ses éléments : cosses, conducteurs cintrés et capuchons d'isolation → 3. La géométrie de la barre supérieure étant différente de celle de la barre inférieure, deux dessins d'ensemble doivent être créés.

Une fois ces deux dessins réalisés, l'outil commence à remplir automatiquement chaque encoche du plan d'ensemble 3D avec le type de barre correspondant. À l'issue de ce processus, le plan d'ensemble 3D se transforme en représentation paramétrique 3D du schéma de bobinage.



Normalement, on peut obtenir plusieurs schémas de bobinage avec différentes combinaisons de cavaliers pour une même solution. L'innovation majeure d'IGM-Winding est sa capacité à mettre en paramètres n'importe quel schéma de bobinage, facilitant la comparaison de différentes variantes et permettant l'édition automatique de tous les dessins de définition.

La conception 3D se poursuit alors avec l'insertion du bobinage dans la carcasse → 4. Cette étape est déterminante pour valider la conception, en particulier celle des entraînements de broyeur sans

fonction *Green Bar* crée deux dessins, celui de la barre verte et celui de la barre finie. Ces dessins sont requis au début du processus de conception et transmis au fournisseur de cuivre pour fabriquer les barres Roebel.

La fonction *Create Assemblies* crée tous les modèles 3D des différentes combinaisons de barres supérieures et inférieures (M01, M02, etc.) et leurs éléments. Elle doit être exécutée avant de produire d'autres dessins.

Les fonctions *Stator Bars* et *Stator Bar Control Dimensions* produisent les dessins des différents types de barres d'un schéma de bobinage avec leurs cotes fonctionnelles pour la fabrication. Ces dessins sont indispensables pour réaliser l'outil à cintrer et les barres, ainsi que pour les contrôles qualité.

Enfin, la fonction *Create 3-D Model* crée le modèle 3D du bobinage.

Phase d'optimisation

Après collecte de toutes les informations et définition des différents schémas de bobinage possibles, l'optimisation peut avoir lieu. L'exemple d'une machine de 540 encoches et 36 paires de pôles illustre les atouts d'IGM-Winding.

À première vue, le schéma de bobinage est assez simple, sans cavaliers dans le bobinage stator et uniquement des cavaliers de phase dans la zone des barres de raccordement. Le détail de la zone encadrée en → 6 et la vue de dessus en → 7 montrent clairement les cavaliers

L'innovation majeure d'IGM-Winding est sa capacité à mettre en paramètres n'importe quel schéma de bobinage, facilitant la comparaison de différentes variantes et permettant l'édition automatique de tous les dessins de définition.

Le problème du voyageur de commerce, difficile à résoudre aujourd'hui, le restera encore longtemps.

réducteur installés en altitude, et pour corroborer par des mesures précises toutes les distances de montage ou d'ajustement des composants critiques dans la machine.

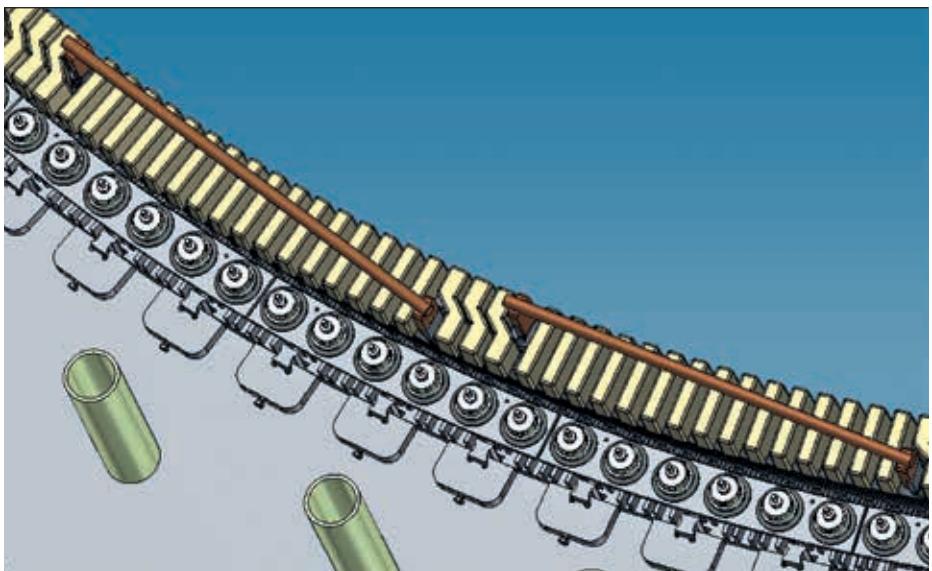
Les barres de raccordement sont introduites dans la carcasse → 5, unique tâche réalisée manuellement. Le concepteur étudie le meilleur trajet possible en fonction des rayons de courbure, de la longueur des barres de raccordement et de la position de la boîte à bornes.

Interface utilisateur IGM-Winding

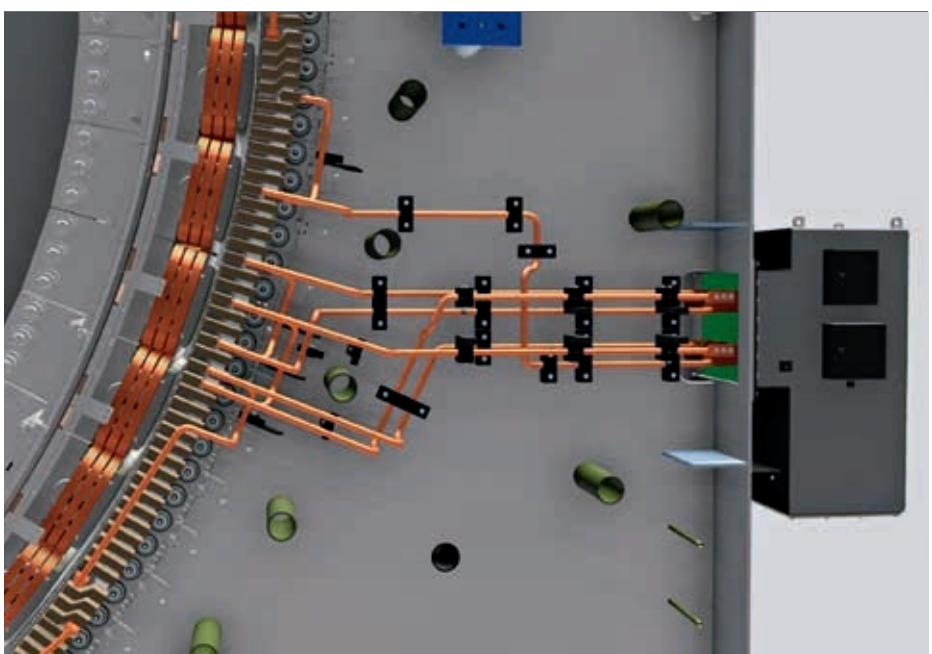
Cette interface permet d'effectuer les paramétrages généraux. Le programme crée les protocoles des différentes étapes ainsi que les dessins qui sont stockés dans les fonctions *Info* et *Log*, exportables au format .csv. Ainsi, la

Pour optimiser un schéma de bobinage, on a recours à des méthodes d'optimisation mathématique très utilisées comme la programmation mixte en nombres entiers et la programmation par contraintes.

4 Insertion du bobinage dans la carcasse



5 La barre de raccordement et les barres de phase sont raccordées à la boîte à bornes. L'espace limité rend la conception délicate.



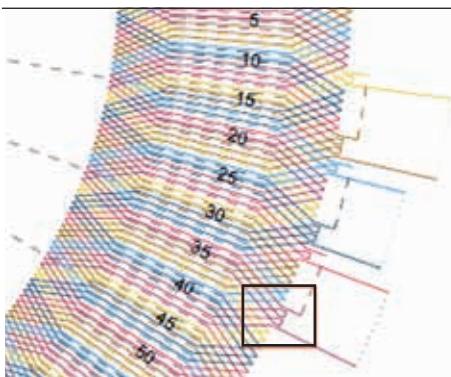
de phase, les barres de raccordement et les conducteurs cintrés. Elles laissent présager deux zones problématiques lorsque les capuchons d'isolation viendront coiffer les raccordements des barres du bobinage : l'espace entre le capuchon d'isolation de la barre de raccordement et le conducteur cintré adjacent ne permet pas de fabriquer le bobinage. Il en va de même entre le capuchon d'isolation du cavalier de phase et le conducteur voisin. La fabrication de ce bobinage au moyen de conducteurs cintrés est irréalisable par manque de place. Il faut trouver une autre solution qui tienne compte de la distance minimale entre les conducteurs ainsi que des

contraintes de fabrication et d'isolation de la nouvelle géométrie de raccordement.

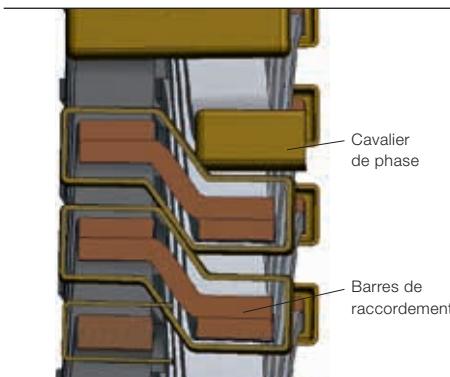
L'optimisation peut intervenir à tout moment du processus de conception ; dans ce cas précis, elle consiste principalement à vérifier la faisabilité de la nouvelle pièce, en conservant les tolérances et entrefers minimaux. La vue 3D du schéma de bobinage donne une vision radicalement différente de la représentation 2D → 8.

L'optimisation des coûts, sans aucune incidence sur la qualité ni les performances, ne vise pas seulement le

6 Schéma de bobinage 3D. Le contenu du carré est détaillé dans la vue de dessus en → 7



7 Représentation 3D du schéma de bobinage



8 Schéma de bobinage 3D



nombre de cavaliers d'un schéma de bobinage. Elle peut également s'intéresser au prix d'un conducteur cintré comparé à celui d'un petit pont cintré. Le coût de l'inductance supplémentaire nécessaire au brasage du conducteur cintré, ainsi que le temps de brasage, l'emplacement des bornes, la longueur, etc., s'annulent lorsque le petit pont est utilisé, l'inductance étant la même que celle des barres de raccordement. Tous ces aspects doivent entrer en ligne de compte dans la recherche de la meilleure solution réalisable.

Optimiser la conception, minimiser les risques

IGM-Winding d'ABB est un remarquable outil d'optimisation du schéma de bobinage des machines électriques tournantes. Il aide les concepteurs et les fabricants à choisir la meilleure solution à partir de modèles paramétriques 3D précis. Il minimise les temps de conception et de création des dessins grâce à un processus global automatisé qui anticipe très tôt les défauts de conception.

L'estimation exacte des distances critiques réduit le risque de problèmes de fabrication et, ultérieurement, de défaillance précoce des bobinages suite à des défauts de conception, en particulier pour les entraînements de broyeur sans réducteur installés en altitude. Destiné à tous les types de moteur et de générateur, IGM-Winding est déjà utilisé par les concepteurs d'entraînements de broyeur sans réducteur ABB.

IGM-Winding d'ABB est un remarquable outil d'optimisation du schéma de bobinage des machines électriques tournantes. Il aide les concepteurs et les fabricants à choisir la meilleure solution à partir de modèles paramétriques 3D précis.

Macarena Montenegro-Urtasun

Giovanni Canal

Process Automation

Baden-Dättwil (Suisse)

macarena.montenegro-urtasun@ch.abb.com

giovanni.canal@ch.abb.com

Jan Poland

ABB Corporate Research

Baden-Dättwil (Suisse)

jan.poland@ch.abb.com

Axel Fuerst

anciennement chez ABB Process Automation

Remerciements

ABB tient à remercier Mensch und Maschine CAD-LAN AG pour son soutien à ce projet et en particulier Peter Voegeli pour avoir trouvé une méthode très efficace de conception de la géométrie 3D dans Inventor.