Moteurs électriques : de l'électromagnétisme à la mécanique

Entretien de Toulouse 2023

Jean-Baptiste DUPONT, Romain LENEVEU

Vibratec SA, 28 chemin du petit bois, 69130 Ecully, FRANCE

Introduction

La volonté de réduire l'empreinte environnementale des activités, en particulier les émissions de gaz à effet de serre, est maintenant une volonté forte. Dans tous les secteurs industriels, en particulier en ce qui concerne les transports, l'électrification est massive, ce qui pousse à une métamorphose rapide des pratiques.

Le secteur aéronautique ne fait pas exception : hybridation de la motorisation, électrification des équipements... Toutes les technologies de moteurs peuvent être rencontrées, même si les moteurs synchrones à aimants permanent sont actuellement les plus couramment choisis pour les applications exigeantes. Les puissances peuvent aller de quelques W pour les équipements en cabine à plusieurs centaines de kW pour les projets d'hybridation de la propulsion. Les vitesses de rotation rencontrées sont situées entre quelques centaine de tours par minute pour les applications les plus courantes et plus de 100 000 rpm pour les machines les plus rapides (compresseur). Pour adapter la vitesse et le couple à l'application ciblée, les machines électriques sont très souvent associées à un réducteur.

Cette évolution est à l'origine de nouveaux problèmes et de nouveaux questionnements, notamment en ce qui concerne la fiabilité, le comportement dynamique, les vibrations et l'acoustique. Ces problématiques peuvent être liées au comportement propre des machines mais aussi aux conséquences de leur intégration dans des systèmes mécaniques complexes (par exemple le couplage avec la dynamique de la ligne d'arbre).

Alors que les performances mécaniques, thermiques et énergétiques sont généralement évaluées et optimisées lors de la conception d'un moteur électrique, le comportement dynamique et acoustique du moteur est rarement pris en compte précocement, même si la fiabilité et le bruit peuvent être des points finalement cruciaux.

L'objectif de cet article est de décrire les principaux mécanismes à l'origine des bruits et vibrations des machines électriques et d'illustrer quelques phénomènes associés. Les origines des bruits et vibrations des réducteurs sont aussi évoquées. Enfin, l'optimisation de ces dispositifs afin de réduire le bruit et les vibrations est abordée.

Bruit et vibration des machines électriques

Principe

Le mécanisme à l'origine du bruit et des vibrations des machines électriques n'est guère différent de ce qui survient dans les autres types de système mécanique. Des phénomènes électromagnétiques se produisent dans la machine. Ils sont à l'origine d'une interaction entre rotor et stator et permettent de créer du couple. Malheureusement, ces excitations d'origine électromagnétique ont également pour effet d'exciter la structure de la machine, qui peut se mettre à vibrer et rayonner du bruit.



Excitation d'origine électromagnétique : la pression de Maxwell

La pression de Maxwell est la principale excitation mécanique à l'origine de la réponse dynamique et acoustique des machines électriques. Elle est liée à l'interaction entre rotor et stator. Elle dépend du flux magnétique (et donc localement de l'induction) qui franchit l'entrefer de la machine.

Comme cette excitation trouve son origine dans les phénomènes électromagnétiques se produisant dans la machine, elle est liée à ses paramètres de conception : type de machine, nombre de pôles, nombre d'encoches...

VIBRATEC

La principale difficulté réside dans le fait que cette excitation est spatialement distribuée et qu'elle comporte un riche contenu fréquentiel. La distribution spatiale des efforts et les fréquences associées sont liées à la conception de la machine. La Figure 2 donne un exemple de distribution spatiale de pression de Maxwell pour une machine synchrone à 4 paires de pôles et 48 encoches.



Figure 2 : Pression de Maxwell à l'intérieur de l'entrefer

Efforts transmis à la ligne d'arbre

La résultante des composantes tangentielles appliquée au rotor génère le couple moyen qui permet de faire entrer la machine en rotation. Les efforts tangentiels incluent également d'autres contributions, dépendantes de l'architecture du moteur, qui créent un couple pulsant (*torque ripple*). La Figure 3 donne un exemple du couple théorique d'une machine électrique à 32 paires de pôles et 192 encoches lors du passage d'une paire de pôle. On observe des variations du couple de l'ordre de 3% de la valeur moyenne.



Figure 3 : Pulsations de couple d'une machine électrique

Cette pulsation de couple peut être transmise à la ligne d'arbre, à la chaine cinématique en aval de la machine électrique ainsi qu'à d'autres composants via le stator. Elle peut alors exciter les arbres en torsion ou se coupler au comportement d'un réducteur. Les conséquences de la pulsation de couple peuvent être sérieuses.

La pulsation de couple peut rester faible pour la plupart des machines électriques industrielles courantes (entre 0% et 20% de pulsation de couple), mais elle est potentiellement importante pour certaines machines de type « SRM » (Switched Reluctance Motor). Les fréquences associées aux pulsations de couple sont la conséquence directe du nombre de paires de pôles au rotor et d'encoches. L'amplitude quant à elle dépend de très nombreux paramètres entrant en compte dans la génération du flux magnétique.

VIBRATEC

Réponse dynamique et acoustique de la machine

La clé de la compréhension de la réponse dynamique de la machine est sa base modale et les coïncidences pouvant se produire entre les excitations et des modes. En effet, une coïncidence spatiale et fréquentielle entre une contribution d'excitation électromagnétique et un mode de la structure a pour conséquence une résonance, caractérisée par de forts niveaux vibratoires. Les résonances sont les phénomènes à éviter.

L'excitation électromagnétique est complexe à analyser car elle est distribuée sur tout l'entrefer. Pour comprendre son contenu, il convient de la décomposer en contributions élémentaires d'excitation caractérisées par une fréquence pure et une distribution spatiale bien identifiée (nombre de lobes sur la circonférence, appelé aussi ordre spatial).

La structure du stator d'un moteur électrique peut être approximée par un cylindre. Chaque mode propre est caractérisé par une fréquence propre, mais aussi par une distribution spatiale La base modale du stator peut être déterminée en utilisant soit une analyse modale expérimentale, soit un modèle par éléments finis (Figure 4).



Figure 4 : Exemple de mode d'un stator : 0 lobe (5000Hz) et 2 lobes (1000Hz)

La mise en parallèle des informations relatives aux excitations (ordres spatiaux-fréquence) et aux modes de la structure (ordres spatiaux-fréquence) permet de comprendre l'apparition des résonances.

Le rayonnement acoustique de la machine (transformation de la vibration en bruit) répond aux règles du rayonnement des structures. La quantité qui traduit ce comportement est le facteur de rayonnement (rendement du rayonnement). Les principales caractéristiques sont :

- Le facteur de rayonnement est toujours faible dans les basses fréquences et haut dans les hautes fréquences
- La fréquence de transition entre ces deux domaines dépend de la taille de la structure rayonnante
- La distribution spatiale de la déformation (nombre de lobes) joue également un rôle prépondérant

Procédure de simulation

Une procédure de simulation a été proposée et validée par comparaison avec des essais. Elle a pour but de reproduire les phénomènes présentés aux paragraphes précédents. Le principe est d'effectuer un calcul électromagnétique-dynamique faiblement couplé. Le moteur électrique est modélisé à l'aide d'un logiciel électromagnétique éléments finis afin de calculer les excitations électromagnétiques appliquées au stator.

Ces données d'excitation sont projetées sur le modèle de la structure de la machine électrique à l'aide d'un outil dédié. Un calcul dynamique et acoustique peut alors être effectué par la méthode des éléments finis classique (dans le domaine fréquentiel).

En réalisant un calcul de la puissance acoustique rayonnée à chaque régime de la gamme de vitesse de fonctionnement, il devient possible de construire un spectrogramme : un graphe donnant le niveau de bruit en fonction de la vitesse et de la fréquence (Figure 5). Ce diagramme est de première importance, il donne une vision synthétique du comportement vibroacoustique de la machine et permet d'identifier les points critiques.



Figure 5 : Exemple de spectrogramme de puissance acoustique rayonnée par un moteur électrique

Phénomènes complémentaires

Défauts et excentricités

La conception de la machine aboutit à la spécification de cotes nominales de la machine. Mais la machine réelle obtenue à l'issue du process de fabrication ne correspond pas parfaitement. L'objectif est qu'elle reste dans les intervalles de tolérance. Les machines réellement fabriquées comporte donc des défauts géométriques (forme et positionnement des pièces) et électromagnétiques (propriétés des aimants et des bobinages) qui vont modifier son comportement vibroacoustique.

Parmi ces défauts, les excentricités sont importantes. En effet, elles vont être à l'origine de charges radiales appliquées sur le rotor (équivalentes à des balourds magnétiques). Ces nouveaux efforts, non présents dans le cas de la machine parfaite, sont susceptibles d'exciter le rotor de la machine en flexion.

Dans le cadre de l'hybridation des turbomachines, un couplage peut apparaitre entre la dynamique de la chaine cinématique et les phénomènes électromagnétiques. Ce point peut être critique, il peut aboutir à la destruction de la turbomachine. Il est nécessaire de le sécuriser.

Alimentation de la machine

Dans la majorité des cas, il est nécessaire de mettre en forme les courants pour alimenter les machines électriques. Un convertisseur électronique de puissance (onduleur) est alors utilisé. La plupart des onduleurs utilisent la méthode de la MLI : modulation de largeur d'impulsion (ou PWM : Pulse Width Modulation). Cette technique implique un découpage haute fréquence des tensions et des courants. Elle génère de nombreuses harmoniques qui peuvent être identifiées dans la signature vibratoire et acoustique de la machine sans que la machine en elle-même n'en soit l'origine.

Cas de la machines électriques à flux axial

Le moteur à flux axial (Figure 6) est une technologie permettant d'obtenir des densités de puissance supérieures. Ces machines sont donc plus compactes à puissance équivalente. A la différence des moteurs classiques à flux radial pour lesquels l'entrefer est en forme de cylindre, les machines à flux axial ont un entrefer en forme d'anneau. Les efforts électromagnétiques dynamiques (variable en fonction du temps) se répartissent de manière non uniforme sur le stator et le rotor (Figure 7).

Ces machines offrent un potentiel intéressant, mais leur comportement vibro-acoustique est encore mal connu. Les principaux problèmes sont liés au fait que les rotors comme les stators sont relativement souples (par rapport aux machine à flux radial).



Figure 6 : Topologie d'une machine électrique à flux axial



Figure 7 : Répartition des efforts appliqués sur le stator d'une machine à flux axial

Bruit et vibrations des trains d'engrenages

Principe

Comme pour les machines électriques, la spécificité du comportement dynamique et acoustique des réducteurs tient dans l'origine des excitations.



Il est communément admis que l'erreur statique de transmission (EST) et les fluctuations de la raideur des dentures sont responsables des efforts dynamiques dans les réducteurs. L'erreur statique de transmission correspond à la différence entre la position réelle de la roue et la position qu'elle devrait occuper si la transmission était parfaite.

L'erreur de transmission statique et les fluctuations de raideur d'engrènement génèrent des forces dynamiques qui sont transmises au carter par les corps de roue, les arbres et les roulements (Figure 8). Le carter du réducteur vibre sous l'effet de ces excitations. Il peut alors transmettre les vibrations à la structure qui l'accueille et/ou rayonner directement du bruit.



Figure 8 : Génération et transmission du bruit et des vibrations dans les réducteurs. 1: excitation paramétrique entre les dents, 2: propagation dans le réducteur, 3: vibration du carter

Procédure de simulation

Comme pour le cas des machines électriques, la procédure de simulation du bruit et des vibrations des réducteurs est réalisée en deux étapes :

- Calcul de l'erreur de transmission et raideur d'engrènement qui constituent les excitations dynamiques
- Calcul de la réponse dynamique de la structure du réducteur sous excitation paramétrique



Figure 9 : Déformation du train d'engrenage sous excitation d'engrènement

La Figure 9 donne des exemples de déformées de roue et de carter de réducteur sous l'effet de l'excitation liée à l'engrenage. Cette procédure de simulation a été validée étape par étape (Figure 10), par des comparaisons avec des mesures étendues et complexes sur différents produits, tels que des boîtes de vitesses automobiles ou des trains d'engrenages industriels. Plusieurs quantités ont été mesurées et comparées à la simulation : la fluctuation de l'erreur de transmission statique, la vibration du carter et le bruit.



Figure 10 : Comparaison entre la vibration du carter mesurée (trait plein) et simulée (trait pointillé)

Cas des trains épicycloïdaux

Les engrenages à trains épicycloïdaux (ou trains planétaires) sont plus complexes que les engrenages à axes parallèles et fixes. Ils associent une roue centrale dite planétaire ou soleil, un porte-satellites, des roues dites satellites et une couronne extérieure (Figure 11).



Figure 11 : Principe d'un train épicycloïdal

Les engrenages planétaires offrent des rapports de transmission élevés dans un ensemble compact. Ils sont largement utilisés dans les transmissions des boîtes de vitesses automatiques des véhicules hybrides ou dans les turbomachines. Par rapport aux engrenages cylindriques à axes fixes et parallèles, la prédiction et le contrôle des excitations générées par un engrenage planétaire restent un problème difficile en raison du couplage entre les multiples engrenages et de la mobilité des axes planétaires. Ainsi, les équations de contact sont résolues en tenant compte de tous les engrènements simultanément (Figure 12).



Figure 12 : Modèle numérique d'engrenage planétaire

La comparaison des simulations numériques et des mesures montre malgré tout la capacité des méthodes numériques à calculer l'erreur de transmission statique globale et à prédire avec précision l'état vibratoire de la structure (Figure 13).

VIBRATEC



Figure 13 : Comparaison entre simulation (à gauche) et essai (à droite) sur la vibration d'un train épicycloïdal

Excitations dynamiques de la ligne d'arbres

La ligne d'arbres, reliant la machine électrique, les engrenages, la machine entrainée, génère d'autres excitations dues aux défauts d'alignements, l'équilibrage, les tolérances de montage, les paliers...Ces excitations sont ordinairement moins importantes que celles générées par les systèmes moteur-réducteur. Leur apparition est généralement signe d'un défaut ou de l'endommagement d'un composant.

Cependant, une ligne d'arbre possède son propre comportement dynamique (modes de torsion et flexion des arbres) qui peut être excité par les efforts électromagnétiques ou d'engrènement décrits plus haut.

Pour des régimes stationnaires ou quasi-stationnaires (montée en régime lente), le principal écueil est l'apparition d'une résonance. Il existe un certain nombre de cas de charge critiques (couple/vitesse) susceptibles de faire entrer en résonance la ligne d'arbre. De plus, à couple faible, ces résonances peuvent générer des pertes de contact au niveau des engrenages, et ainsi des chocs entrainant du bruit et des dégradations rapides.

Optimisation des performances vibro-acoustiques des chaînes cinématiques électrifiées

Les performances mécaniques, thermiques et énergétiques sont généralement évaluées et optimisées lors de la conception d'une machine électrique. Cependant, le comportement vibratoire et acoustique de la machine est rarement pris en compte. Malgré tout, ce comportement peut être optimisé grâce à des méthodes permettant de minimiser les excitations dynamiques. Elles peuvent concerner la machine électrique comme le réducteur et s'appliquent à tous les types de problématiques : fiabilité ou bruit.

Méthode d'optimisation des moteurs électriques

VIBRATEC

La méthode de simulation présentée précédemment permet de calculer le comportement vibro-acoustique global (bruit, vibrations, pulsations de couple, efforts transmis à la structure d'accueil) pour un design de machine. Le principe de l'optimisation est d'inclure cette simulation dans un algorithme d'optimisation sous contrainte permettant de déterminer les paramètres de conception qui minimisent un objectif (le bruit, les vibrations, la pulsation de couple...) tout en garantissant les performances de la machine (couple moyen produit, rendement...).

La minimisation des excitations électromagnétiques est obtenue en réduisant les contributions harmoniques de la pression de Maxwell. Les amplitudes de ces contributions sont très sensibles aux paramètres de conception électromagnétique, tels que la forme des pôles ou des dents. Par conséquent, un avantage considérable de cette méthode est que les changements géométriques appliqués à la conception sont faibles d'un point de vue mécanique, et qu'ils n'impliquent aucune augmentation de la masse du moteur électrique ni aucun coût supplémentaire significatif. La Figure 14 donne un exemple d'optimisation d'une machine synchrone à aimants. L'optimisation visait le fort niveau de bruit à 4700rpm et l'a réduit de 14dB sans surcoût.



Figure 14 : Comparaison du bruit avant et après optimisation du design électromagnétique

Optimisation des engrenages

Dans la mesure où l'erreur statique de transmission est la source principale du bruit et des vibrations des réducteurs, l'optimisation des engrenages a pour but de réduire ce terme source. L'algorithme d'optimisation a donc pour objectif de déterminer la forme des dentures qui permettent de minimiser l'excitation dans des conditions de fonctionnement données. L'exemple de la Figure 15 montre que des réductions significatives peuvent être obtenues en corrigeant simplement la forme des dentures. Ces outils d'optimisation peuvent traiter la majorité des types d'engrenage (droits, hélicoïdaux, épicycloïdaux) et s'appliquer à des roues de tous les types de matériau.



Figure 15 : Erreur statique de transmission (STE) pour le design initial et pour différents designs optimisés