

Magnetothermal study of a superconducting coil in a carbon therapy cyclotron magnet

Auteur : Denis, Louis

Promoteur(s) : Vanderheyden, Benoit; Geuzaine, Christophe

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil physicien, à finalité approfondie

Année académique : 2022-2023

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/17393>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Author: Louis DENIS

Academic supervisors: Prof. Christophe GEUZAINÉ, Prof. Benoît VANDERHEYDEN

Faculty: Applied Sciences

Section: Engineering Physics

Academic year: 2022-2023

Magnetothermal study of a superconducting coil in a carbon therapy cyclotron magnet

Abstract

The C400 is the first compact superconducting cyclotron used for carbon therapy in the world. During the ramp-up procedure from zero to nominal current, the changing magnetic field leads to heat dissipation within the superconducting coil. The aim of this thesis is to predict the magnetothermal behaviour of the superconducting coil during ramp-up. To this end, a finite element model of the C400 has been developed using the GetDP open-source software.

Based on a detailed theoretical background, the magnetic and thermal models are first described individually as their numerical parameters are fine-tuned for optimal efficiency. The magnetothermal results are then studied in detail. The hysteresis losses, occurring in superconducting filaments, play a central role in the magnetothermal behaviour of the coil, as the inter-filament coupling losses are found to be negligible. Due to the efficiency of the liquid helium cooling system, the maximal temperature rise in the coil is less than 0.01 K. The results are compared with expectations from dimensional analysis and several parametric studies are carried out. Among other results, the ramp-up procedure cannot be performed in less than 20 minutes and an optimized current profile allows the maximal temperature rise to be reduced by 14 %.

In the second part of this work, a filament model is introduced to compute the hysteresis loss at the superconducting filament scale. The results are compared with analytical approximations, highlighting the complexity of the physical phenomena involved. Among other observations, the critical current density dependence on flux density and the effect of transport current on flux penetration cannot be neglected. Finally, a multi-scale approach, based on the filament model, is proposed and implemented for computing the hysteresis loss within the coil, together with the corresponding temperature distribution. Its robustness significantly improves the accuracy of the results, since analytical approximations underestimate the losses in the intermediate field regime.

The observed temperature rise in the coil is small and the filaments should remain in the superconducting state during a regular ramp-up procedure.

Keywords

Magnetothermal study, Superconducting magnet, AC losses, Multi-scale modelling, Finite element method

Auteur: Louis DENIS

Promoteurs académiques: Prof. Christophe GEUZAINÉ, Prof. Benoît VANDERHEYDEN

Faculté: Sciences Appliquées

Section: Ingénieur Civil Physicien

Année académique: 2022-2023

Etude du comportement magnétothermique d'une bobine supraconductrice dans un cyclotron pour l'hadronthérapie

Résumé

Le C400 est le premier cyclotron compact à aimant supraconducteur au monde construit pour l'hadronthérapie par ions carbone. Pendant la procédure de montée en puissance du courant nul au courant nominal, la variation temporelle du champ magnétique entraîne une dissipation de chaleur à l'intérieur de la bobine supraconductrice. L'objectif de ce mémoire est de prédire le comportement magnétothermique de la bobine supraconductrice pendant la montée en puissance. Un modèle du C400 a ainsi été développé à l'aide de la méthode des éléments finis et du logiciel GetDP.

Sur base d'un contexte théorique détaillé, les modèles magnétiques et thermiques sont d'abord décrits individuellement, tandis que leurs paramètres numériques sont affinés pour une efficacité optimale. Les résultats magnétothermiques sont alors décrits en détail. Les pertes par hystérèse, qui se produisent dans les filaments supraconducteurs, jouent un rôle fondamental dans le comportement magnétothermique de la bobine, les pertes par couplage entre les filaments étant négligeables. Grâce à l'efficacité du système de refroidissement à l'hélium liquide, l'augmentation maximale de température dans la bobine est inférieure à 0.01 K. Les résultats sont comparés aux attentes de l'analyse dimensionnelle et plusieurs études paramétriques sont réalisées. Entre autres, la procédure de montée en puissance ne peut pas être effectuée en moins de 20 minutes et un profil de courant optimisé permet de réduire l'élévation maximale de température de 14 %.

Dans la deuxième partie de ce travail, un modèle de filament est introduit pour calculer les pertes par hystérèse à l'échelle du filament supraconducteur. Les résultats sont comparés à des approximations analytiques, mettant en évidence la complexité des phénomènes physiques observés. Entre autres, la dépendance de la densité de courant critique par rapport à l'induction magnétique et l'effet du courant de transport sur la pénétration du flux ne peuvent être négligés. Enfin, une approche multi-échelle, basée sur le modèle du filament, est proposée et implémentée pour calculer les pertes par hystérèse à l'intérieur de la bobine, ainsi que la distribution de température correspondante. Sa robustesse améliore considérablement la précision des résultats, puisque les approximations analytiques sous-estiment les pertes dans le régime de champ intermédiaire.

L'augmentation de température observée dans la bobine est faible et les filaments devraient rester dans l'état supraconducteur pendant une procédure de montée en puissance régulière.

Mots-clés

Etude magnétothermique, Aimant supraconducteur, Pertes AC, Modélisation multi-échelle, Méthode des éléments finis