

Abstract

High-Temperature Superconductors (HTS) can be the game changers in the next magnet generation for nuclear fusion and particle accelerators. They could also enable further improvements in cancer treatment devices and in technologies for future means of transportation and lossless power transmission. In perspective of 20 + T field magnets (impossible target for the low-temperature superconductor counterparts) and more compact layouts for fusion reactors, which can make them marketable, the HTS are the alternative which can allow high transport current at very high field, guaranteeing at the same time a higher stability. Among them, the Rare-Earth Barium Copper Oxide (ReBCO) coated conductors seem to be a very promising option due to their high critical temperature and the extremely high critical current density. They are flat ceramic multilayer materials in which a 1 – 2 μm of superconducting layer is coated by a copper stabilizer and mechanically supported by a metal substrate. Combining the high mechanical strength of the substrate, to withstand axial tensile stress, and the elasticity of ReBCO layer, to resist to compressive strain, the Conductor-on-Round-Core (CORC[®]) cable conductor has been introduced in 2009. It is composed of multiple tapes wounded in layers alternatively clockwise and counterclockwise around a central copper core. It is the only round conductor made of flat HTS tape: this solution guarantees a higher mechanical and electrical isotropy. High-performance cables are essential for a correct operation of magnets, safe operating conditions and high field quality. The critical current I_c , the maximum current which can be transported without transitioning to the normal state, is a key indicator of the cable/coil performances. I_c is strongly affected by production process and operating conditions: deformation, temperature, and magnetic field. The characterization of CORC[®] mostly occurs with dedicated experimental campaigns, but sufficient data are still missing. Development of ad-hoc numerical models should proceed in parallel to reproduce and, in perspective, predict the cable behavior. Here, a novel full-3D finite-element numerical multiphysics thermal and electromagnetic

model for CORC[®]-like conductors is presented, aiming at the characterization of the critical current. The model is implemented in COMSOL Multiphysics[®]. The I_c strain degradation, due to winding and bending, has been accounted with a simplified evaluation of the strain map, based on pure geometrical assumptions and from data available in the literature. The thermal model accounts for Joule losses (if any), conduction among overlapping tapes and an active convective cooling of the fluid, and it is coupled to the electromagnetic module. The electromagnetic model is based on the $T - A$ formulation: leveraging on the high aspect ratio of the thin ReBCO tapes, the superconducting domain is assumed as a thin shell. The current distribution among tapes and layers is guaranteed by using a set of self-consistent boundary conditions adopted for the first time in this kind of simulations. The new boundary conditions allow current re-distribution if any thermal or magnetic perturbation suddenly happens in a tape. The model is verified and benchmarked against other well-established formulations on a set of test cases. Starting from a tape model, the validation has been extended to simplified cases (2-tapes 1-layer CORC[®]) to more complex geometries (6-tapes 3-layers CORC[®], straight and bended, and 12-tapes 6-layers CORC[®]). This work has been carried out in collaboration with the Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), which provided test and data for the validation. The comparison of the computed $V - I$ curve of cables with available experimental data shows that the main physics features of the cable are well captured by the model, including performance degradation due to cable tapering at the terminations, and sets starting points for further improvements for the numerical model and the cable design.

Keywords: High-temperature superconductors, hybrid formulation, CORC[®] cables, ReBCO tapes, critical current, numerical models, multiphysics.

Sommario

I superconduttori ad alta temperatura (HTS) rappresentano un possibile fattore di svolta per la prossima generazione di magneti per lo sviluppo di tecnologie come reattori a fusione nucleare e acceleratori di particelle, nonché nel miglioramento di dispositivi medici per il trattamento del cancro, dei futuri mezzi di trasporto e della trasmissione di potenza elettrica senza perdite. Nella prospettiva di costruire magneti a $20 + T$, limite irraggiungibile dai superconduttori a bassa temperatura, e reattori a fusione più compatti, tanto da poterli rendere commercializzabili, gli HTS sono l'alternativa che permette di avere un'alta corrente di trasporto a campi molto elevati, garantendo allo stesso tempo un'elevata stabilità termica. I nastri conduttivi a base di terre rare, Rare-Earth Barium Copper Oxide (ReBCO), risultano tra le opzioni più promettenti, grazie alla loro alta temperatura critica e densità di corrente critica. I ReBCO sono dei sottili materiali ceramici, in cui lo strato superconduttivo di $1 - 2 \mu\text{m}$ è ricoperto dallo stabilizzatore in rame e supportato meccanicamente da un substrato di metallo. Combinando la durezza del substrato, in grado di resistere agli sforzi assiali, e l'elasticità del ReBCO, resistente alla compressione, nel 2009 è stato introdotto il design di cavo chiamato Conductor-on-Round-Core (CORC®). Il cavo è costituito da più nastri di ReBCO avvolti intorno ad un stabilizzatore centrale di rame, cambiando alternativamente la direzione di avvolgimento. È l'unico cavo di forma circolare composto da nastri HTS, che consente una migliore isotropia meccanica ed elettrica. I cavi ad alte prestazioni sono essenziali per il corretto funzionamento dei magneti, per operare in sicurezza e per avere una buona qualità di campo. La corrente critica I_c , che è la corrente massima trasportabile da un superconduttore prima che transisca allo stato normale, è un indicatore chiave delle prestazioni di cavi e di bobine. La I_c si degrada fortemente a causa del processo di produzione e delle condizioni operative come lo stato di deformazione, la temperatura ed il campo magnetico. La caratterizzazione dei CORC® avviene principalmente attraverso campagne sperimentali, ma in letteratura c'è ancora una carenza di questi dati. Lo

sviluppo di modelli numerici, sviluppati ad-hoc, dovrebbe procedere in parallelo per riprodurre e, in prospettiva, predire il comportamento del cavo. In questo lavoro di tesi è presentato un modello numerico multifisico ad elementi finiti per i conduttori di tipo CORC[®] per la caratterizzazione della corrente critica. Il modello è sviluppato in COMSOL Multiphysics[®]. La degradazione della I_c dovuta all'avvolgimento intorno allo stabilizzatore e alla curvatura, nel caso in cui il cavo sia piegato, è tenuta in conto attraverso una valutazione semplificata della deformazione basata su pure assunzioni geometriche e di dati disponibili in letteratura. Il modello termico tiene conto delle perdite per effetto Joule (se presenti), della conduzione tra nastri sovrapposti e della convezione naturale del fluido. Inoltre, è accoppiato con il modello elettromagnetico. Quest'ultimo è basato sulla formulazione $T - A$: sfruttando l'alto rapporto d'aspetto del nastro ReBCO, il dominio superconduttivo è assunto come guscio sottile. La distribuzione di corrente tra i nastri e gli strati del cavo è garantita attraverso l'implementazione di una condizione al contorno autoconsistente, adottata per la prima volta in questo tipo di simulazioni. La nuova condizione al contorno permette la redistribuzione di corrente in caso di un'improvvisa perturbazione termica o magnetica in uno dei nastri. Il modello è verificato con altre formulazioni, ben consolidate in letteratura, in diversi casi-studio. Partendo da un modello del singolo tape, la validazione è stata estesa da casi più semplificati di CORC[®] (2-tapes 1-layer) a geometrie più complesse (6-tapes 3-layers CORC[®], dritto e piegato, e 12-tapes 6-layers CORC[®]). Questa attività è stata condotta in collaborazione con il Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), che ha fornito i dati dei test per la validazione. Il confronto tra le curve tensione-corrente con i dati disponibili ha dimostrato che le principali caratteristiche fisiche del cavo sono ben rappresentate dal modello, inclusa la degradazione che avviene nelle terminazioni (dove i tape si aprono e si allontanano dallo stabilizzatore), fissando inoltre dei punti di partenza per ulteriori miglioramenti, non solo del modello numerico, ma anche per il design del cavo.

Parole-chiave: Superconduttori ad alta temperatura, formulazioni ibride, cavi CORC[®], nastri di ReBCO, corrente critica, multifisica.