

Vers une utilisation optimale des infrastructures électriques existantes : Application au câble d'export d'une ferme houlomotrice

Projet EMODI : Projet-ANR-14-CE05-0032
Projet BlueGrid : Projet Région Bretagne et ENS-Rennes

C.-H. Bonnard¹ , A. Blavette¹ et S. Bourguet²

¹SATIE, ENS Rennes

² IREENA, Université de Nantes

18 septembre 2019

- 1 Contexte
 - Introduction aux méthodes de dimensionnement
 - Enjeux et problématiques

- 2 Aspects expérimentaux et modélisation
 - Un exemple de câble sous-marin
 - Modélisation
 - Aspects expérimentaux

- 3 Étude de cas
 - Description
 - Quelques résultats

- 4 Conclusion et perspectives

Introduction aux méthodes de dimensionnement

Rappel de l'objectif principal

- Transmettre un maximum d'énergie sans que la température du conducteur ne dépasse la température maximale admissible par le diélectrique (ici $90\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Introduction aux méthodes de dimensionnement

Rappel de l'objectif principal

- Transmettre un maximum d'énergie sans que la température du conducteur ne dépasse la température maximale admissible par le diélectrique (ici 90 °C).

Méthode de dimensionnement proposé par IEC :

- Statique : Pas appropriée à des profils de courant qui fluctuent rapidement.

Introduction aux méthodes de dimensionnement

Rappel de l'objectif principal

- Transmettre un maximum d'énergie sans que la température du conducteur ne dépasse la température maximale admissible par le diélectrique (ici 90 °C).

Méthode de dimensionnement proposé par IEC :

- Statique : Pas appropriée à des profils de courant qui fluctuent rapidement.
- "Dynamique" : Basée sur des régimes cycliques plus ou moins prévisibles et réguliers. Pas idéale pour des profils très changeants dont les durées et les amplitudes peuvent beaucoup varier.

Introduction aux méthodes de dimensionnement

Rappel de l'objectif principal

- Transmettre un maximum d'énergie sans que la température du conducteur ne dépasse la température maximale admissible par le diélectrique (ici 90 °C).

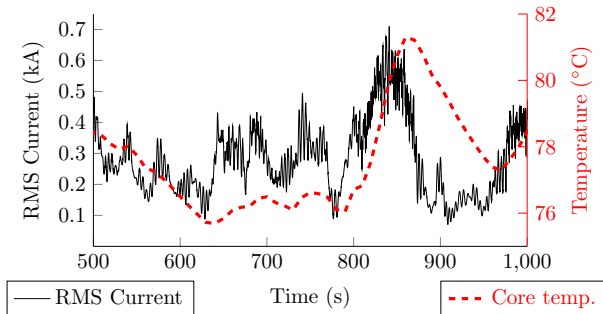
Méthode de dimensionnement proposé par IEC :

- Statique : Pas appropriée à des profils de courant qui fluctuent rapidement.
- "Dynamique" : Basée sur des régimes cycliques plus ou moins prévisibles et réguliers. Pas idéale pour des profils très changeants dont les durées et les amplitudes peuvent beaucoup varier.

Donc...

- Des méthodes qui ne sont pas adaptées aux profils des courants générés par des parcs houlomoteurs qui présentent des profils très fluctuants, avec de fortes variations dans les amplitudes de courant.

Exemple de profil de courant d'une ferme houlomotrice + température câble



Un câble sous-marin est **temporairement** capable de supporter des **courants bien supérieurs** à celui pour lequel il a été dimensionné. On peut donc profiter de cette **flexibilité thermique** pour **augmenter la puissance** des fermes houlomotrices.

Enjeux et problématiques

Optimisation de l'utilisation des câbles

- Pour des câbles sous-marins reliés à des fermes de production type MRE (ex : houlomoteur)

Enjeux et problématiques

Optimisation de l'utilisation des câbles

- Pour des câbles sous-marins reliés à des fermes de production type MRE (ex : houlomoteur)

Ce qui nécessite...

- Un modèle suffisamment fiable qui retourne des résultats de simulations précis

Enjeux et problématiques

Optimisation de l'utilisation des câbles

- Pour des câbles sous-marins reliés à des fermes de production type MRE (ex : houlomoteur)

Ce qui nécessite...

- Un modèle suffisamment fiable qui retourne des résultats de simulations précis

Donc...

- Un modèle validé expérimentalement

Enjeux et problématiques

Optimisation de l'utilisation des câbles

- Pour des câbles sous-marins reliés à des fermes de production type MRE (ex : houlomoteur)

Ce qui nécessite...

- Un modèle suffisamment fiable qui retourne des résultats de simulations précis

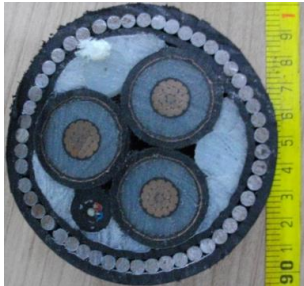
Donc...

- Un modèle validé expérimentalement

Qui permettra

- De simuler des cas réalistes de production d'énergie électrique à partir d'EMR, et de déterminer dans quelle mesure on pourrait **augmenter la puissance des fermes EMRs en conservant les infrastructures électriques existantes.**

Échantillon pour la vérification/validation expérimentale



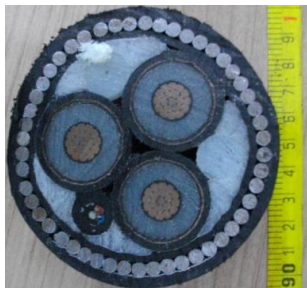
Câble statique (export) installé au Croisic sur le site SEM-REV de l'École Centrale de Nantes.



Caractéristiques

- Câble triphasé
- $S_{\text{âme}} = 95 \text{ mm}^2$, cuivre
- 20 kV, 290 A
- $T_{\text{max}} = 90 \text{ °C}$ (âme)
- Isolation XLPE
- 2 Échantillons disponibles
 - $L \approx 5 \text{ à } 6 \text{ m}$

Le câble électrique : Un problème multiphysique



Câble statique installé au Croisic sur le site SEM-REV de l'École Centrale de Nantes

$$\begin{aligned}\rho_m C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} &= \nabla \cdot (\kappa(T) \nabla T) + Q \\ \nabla \times H &= J \\ B &= \nabla \times A \\ E &= -\frac{\partial A}{\partial t} \\ J &= \sigma E\end{aligned}$$

Variables de couplage

- la température T
- les pertes $Q = \int_V \rho J^2 dV$

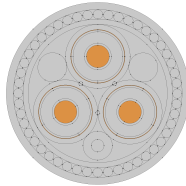
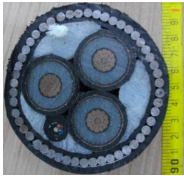
On a donc

- un problème électromagnétique
 - un problème thermique
- } non linéaires, couplés

MEF : Implémentation dans COMSOL Multiphysics et Matlab

Détails de modélisation :

- Méthode des éléments finis, modélisation "électromagnétothermique"
- Modèle Matlab : Circuit électrique équivalent (RC)
- Propriétés non linéaires ($\rho_{elec}(T)$, $C_p(T)$ et $\kappa(T)$)
- Frontières : Convection et rayonnement OU ensouillement



$$\begin{array}{l} -\nabla(KT) \cdot \mathbf{n} = 0 \\ \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \text{div}(-K\nabla T) = Q \\ T = \text{Const.} \end{array} \quad \begin{array}{l} -\nabla(KT) \cdot \mathbf{n} = h(T_{out} - T) \\ -\nabla(KT) \cdot \mathbf{n} = 0 \end{array}$$

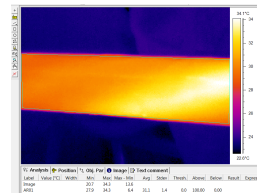
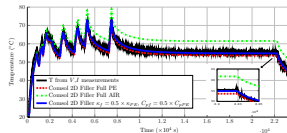
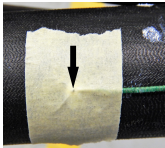
Aspects expérimentaux

Injection de courant

- Source commandée jusqu'à 900 A DC et $3 \times 300 A_{max}$ en triphasé.

Mesures et évaluation de la température

- Thermocouples en divers endroits
- Méthode Voltampèremétrique (4 points).
 - Mesures de tension
 - Mesures de courant
 - $\rho_{Cu}(T) = \rho_0 * [1 + \alpha (T - T_0)]$.
- Imagerie thermique



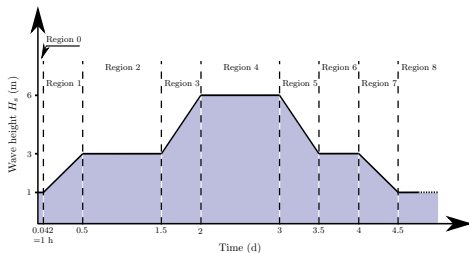
Étude de cas : Description

Séquence d'états de mer fictive

- Basée sur Site Reedsport aux USA
- Durées et transitions entre les états réalistes

Définir le nombre d'houlogénérateurs

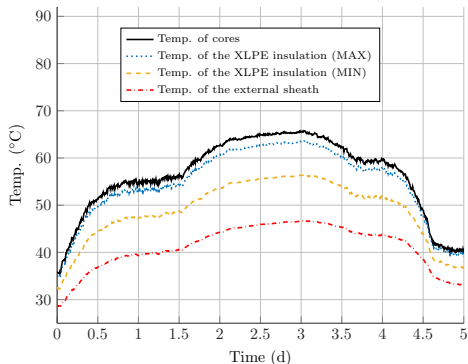
- À partir du courant électrique
 - $\max(I_{farm}(t)) |_{N_{WEC}} \leq I_r$
- À partir de la température
 - $\max(T_{core}(t)) |_{N_{WEC}} \leq T_{max}$
 - $\max(T_{core}(t)) |_{N_{WEC}(t)} \leq T_{max}$



Résultats et analyse

CAS 1 : Référence

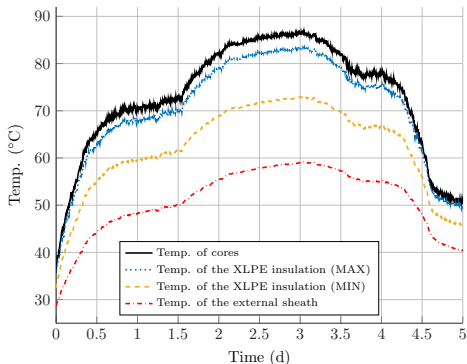
- À partir du courant électrique
 - $\max(I_{farm}(t)) |_{N_{WEC}} \leq I_r$
- $N_{WEC} = 11$
- $T \approx 65^\circ\text{C} < T_{lim}$
- Il y a de la marge pour exporter plus d'énergie



Résultats et analyse

CAS 2

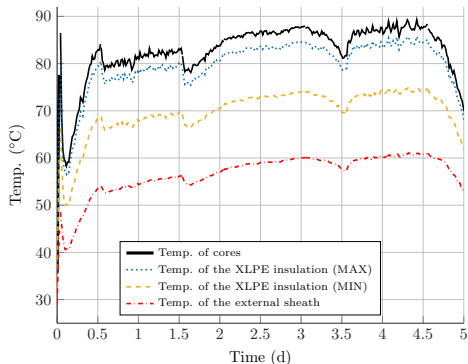
- À partir de la température
 - $\max(T_{core}(t)) |_{N_{WEC}} \leq T_{max}$
- $N_{WEC} = 13$
- $T \approx 87^\circ\text{C} < T_{lim}$
- **Gain de +18.2 %**
- Il reste encore des possibilités d'exporter plus d'énergie



Résultats et analyse

CAS 3

- À partir de la température
 - $\max(T_{core}(t)) |_{N_{WEC}(t)} \leq T_{max}$
- $N_{WEC} = 13$ à 15
- $T \approx 88.9^\circ\text{C} < T_{lim}$
- **Gain de +27 %**
- Il reste encore des possibilités d'exporter plus d'énergie mais gain potentiel faible.



Conclusion et perspectives

Etude préliminaire : Des résultats encourageants

- Exploiter la flexibilité electrothermique peut permettre d'augmenter la puissance nominale des parcs houlomoteurs (+ 27% de production d'énergie)
- Pas d'investissements nécessaires au niveau des câbles d'export

Conclusion et perspectives

Etude préliminaire : Des résultats encourageants

- Exploiter la flexibilité electrothermique peut permettre d'augmenter la puissance nominale des parcs houlomoteurs (+ 27% de production d'énergie)
- Pas d'investissements nécessaires au niveau des câbles d'export

Mais il faut voir le système dans sa globalité dans de futur travaux

- Approx. 300 jours de données d'états de mer mesurées sur le site SEM-REV.
- Identification des goulets d'étranglement en étudiant les autres composants du réseau de transmission de l'énergie (boite de jonction, transformateur, disjoncteur, etc.)

Conclusion et perspectives

Etude préliminaire : Des résultats encourageants

- Exploiter la flexibilité electrothermique peut permettre d'augmenter la puissance nominale des parcs houlomoteurs (+ 27% de production d'énergie)
- Pas d'investissements nécessaires au niveau des câbles d'export

Mais il faut voir le système dans sa globalité dans de futur travaux

- Approx. 300 jours de données d'états de mer mesurées sur le site SEM-REV.
- Identification des goulets d'étranglement en étudiant les autres composants du réseau de transmission de l'énergie (boite de jonction, transformateur, disjoncteur, etc.)

Et aller vers des méthodes d'optimisation

- En limitant la durée de calcul
 - MEF->Matlab
 - S'affranchir des non-linéarités (approximation)



Projet EMODI (Offshore Energy Grids Monitoring and Diagnosis)

Financeur : ANR

Porteur du projet : RTE

Co-task Leaders : Anne Blavette (SATIE, ENS Rennes),
Salvy Bourguet (IREENA, Univ. Nantes)

Projet BlueGrid
Financeurs : Région Bretagne (SAD : Stratégie
d'Attractivité Durable) et ENS Rennes
Porteur du projet : Anne Blavette (SATIE, ENS Rennes)

