

CẢI THIỆN SAI SỐ CÁC ĐẠI LƯỢNG TRƯỜNG TRONG BÀI TOÁN TỪ ĐỘNG CẤU TRÚC PHỨC TẠP BẰNG PHƯƠNG PHÁP BÀI TOÁN CON

IMPROVMENT OF INACCURACIES ON LOCAL FIELDS IN COMPLEX STRUCTURE MAGNETODYNAMIC PROBLEMS BY A SUBPROBLEM METHOD

¹**Đặng Quốc Vương(*)** và ²**Nguyễn Đức Quang**

¹Viện Điện, Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội; ^{*2} Đại học Điện lực

Ngày nhận bài: 07/07/2021, Ngày chấp nhận đăng: 14/09/2021, Phản biện: TS. Lê Anh Tuấn

Tóm tắt:

Mô hình bài toán từ động từ đóng vai trò rất quan trọng trong các thiết bị điện-điện tử và hệ thống điện. Bởi vậy, việc xây dựng mô hình toán để nghiên cứu và tính toán sự phân bố của các đại lượng trường (từ trường, dòng điện xoáy, tổn hao công suất...) trong hệ thống nói trên là bài toán luôn mang tính thời sự đối với các nhà nghiên cứu và thiết kế, đặc biệt đối với bài toán từ động có cấu trúc phức tạp. Trong bài báo này, phương pháp bài toán con được đề xuất với công thức véc tơ từ thế để phân tích và hiệu chỉnh sai số của các đại lượng trường xuất hiện từ hiệu ứng cạnh và góc của miền mỏng dẫn từ. Sự phát triển của phương pháp được kiểm nghiệm và áp dụng vào bài toán thực tiễn.

Từ khóa:

Bài toán từ động, từ thế véc tơ, dòng điện xoáy, phương pháp bài toán con.

Abstract:

Modeling of magnetodynamic problems plays an important role in electrical and electronic equipments and electrical systems. Thus, a mathematic model is presented to research and compute distributions of local fields (magnetic fields, eddy currents, joule power losses...) in the above systems being very necessary and meaningfull for researchers and designers, in particular to complex structure magnetodynamic problems. In this paper, a subproblem method is proposed for magnetic vector potential formulations to analyse and correct errors of local fields appearing near edges and corner effects of thin shell models. The development of the method is illustrated and validated on a practical test.

Key words:

Magnetodynamic problems, magnetic vector potentials, eddy currents, subproblem method.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Những năm gần đây, mô hình bài toán vỏ mỏng đã được một vài tác giả phát triển [1] để tính toán sự và mô phỏng sự phân bố

của từ trường và dòng điện xoáy trên trong bài toán từ động với vùng dẫn có cấu trúc vỏ mỏng. Nội dung của phương pháp được thực hiện như sau: Một miền mỏng dẫn từ

dạng khối “volume” sẽ được chuyển về miền mỏng dẫn từ dạng bề mặt “surface”, sau đó việc chia lưới sẽ được thực hiện trên bề mặt đó [1]. Tuy nhiên, điều này dẫn đến bỏ qua hiệu ứng cạnh và góc của miền dẫn, và nghiệm tìm được, thường gặp phải một sai số và cần phải được hiệu chỉnh, đặc biệt khi chiều dày của miền dẫn tăng lên.

Để vượt qua được khó khăn trên, trong bài báo này, phương pháp bài toán con được đề xuất để cải thiện các sai số của các đại lượng trường (từ trường, dòng điện xoáy, tổn hao công suất...) xuất hiện từ vùng mỏng. Ý tưởng của phương pháp được thực hiện theo trình tự: Một bài toán đầy đủ với kích thước lớn được chia thành các bài toán nhỏ với kích thước hình nhỏ hơn, đó là [3-5]:

- Bài toán con thứ nhất được giải với cuộn dây mà không bao gồm bất kỳ miền mỏng nào;

- Bài toán con thứ hai là được thêm miền mỏng vào mà không bao gồm bài toán con thứ nhất đã giải trước đó;

- Bài toán con thứ ba là bài toán hiệu chỉnh nghiệm từ bài toán con thứ hai.

Mỗi một bài toán nhỏ được giải trên chính miền và lưới của nó mà không phụ thuộc vào lưới và miền của bài toán trước và sau đó. Điều này sẽ giảm được thời gian tính toán vì không phải xét lưới của các bài toán trước đó.

2. MÔ HÌNH BÀI TOÁN TỪ ĐỘNG

2.1. Phương trình Maxwell

Mô hình bài toán từ động SP_i (với $i = 1, 2, \dots$ là số thứ tự của các bài toán nhỏ) mà

có nghiệm đầy đủ là tập hợp nghiệm của các bài toán nhỏ tương ứng với các giá trị của i . Bài toán xác định trong miền Ω_i với biên là $\partial\Omega_i = \Gamma_i = \Gamma_{h,i} \cup \Gamma_{b,i}$. Trong đó, dòng điện xoáy được xác định trong miền dẫn $\Omega_{c,i}$ ($\Omega_{c,i} \subset \Omega_i$), cuộn dây thuộc về vùng không dẫn Ω_c^C , với $\Omega_{c,i} = \Omega_{c,i} \cup \Omega_{c,i}^C$. Hệ phương trình Maxwell với các luật trạng thái được viết như sau [2], [9-10]:

$$\text{curl } \mathbf{h}_i = \mathbf{j}_i, \text{div } \mathbf{b}_i = 0, \text{curl } \mathbf{e}_i = -\partial_t \mathbf{b}_i \quad (1a-b-c)$$

$$\mathbf{b}_i = \mu_i \mathbf{h}_i + \mathbf{b}_{s,i}, \mathbf{e}_i = \sigma_i^{-1} \mathbf{j}_i + \mathbf{e}_{s,i} \quad (2a-b)$$

$$\mathbf{n} \times \mathbf{h}_i|_{\Gamma_{h,i}} = \mathbf{j}_{f,i}, \quad (3)$$

Trong đó $\mathbf{b}_i$ là mật độ từ cảm, $\mathbf{h}_i$ là cường độ từ từ trường, $\mathbf{e}_i$ là cường độ điện trường, $\mathbf{j}_i$ là mật độ dòng điện, μ_i là độ từ thẩm của vật liệu, σ_i là độ dẫn điện and $\mathbf{n}$ véc tơ pháp tuyến hướng ra ngoài của vùng nghiên cứu Ω_i . Trường $\mathbf{j}_{f,i}$ trong (3) là nguồn mặt SS và thường được xác định bằng không đối với điều kiện biên đồng nhất và khác không khi nó được xem như là một nguồn SS tồn tại trên giữa hai biên dương (Γ_i^+) và biên âm (Γ_i^-) của miền mỏng Γ_i . Các trường $\mathbf{b}_{s,i}$ và $\mathbf{e}_{s,i}$ trong (2 a-b) là các nguồn VSs.

2.2. Ràng buộc giữa các bài toán nhỏ SPs với nguồn SS và nguồn VSs

Ràng buộc giữa các bài toán nhỏ SPs trong miền mỏng được xác định thông qua nguồn mặt SS và nguồn khối VS. Trong đó, nguồn SS kể đến sự thay đổi điều kiện tiếp giáp giữa 2 bài toán con, còn nguồn VS kể đến sự thay đổi đặc tính vật liệu từ vùng này sang vùng khác. Nghiên cứu đã được thực hiện với công thức véc tơ từ thế

$\mathbf{a}_i$, khi kể đến thành phần không liên tục $\mathbf{a}_{d,t,i}$ và thành phần tiếp tuyến $\mathbf{a}_{t,i} = (\mathbf{n} \times \mathbf{a}_i) \times \mathbf{n}$ thông qua miền mỏng [1], có nghĩa rằng [7-8]:

$$[\mathbf{n} \times \mathbf{a}_{t,i}]_{\Gamma_{ts,i}} = \mathbf{a}_{t,i}, \quad (4)$$

trong đó, $\mathbf{a}_{d,t,i}$ được xác định bằng không trên biên Γ_i^- của miền mỏng (TS), nơi mà bỏ qua thành phần từ thông đến. Đối với thành phần trên biên Γ_i^+ được xác định như sau [1]:

$$\mathbf{a}_i|_{\Gamma_{ts,i}^+} = \mathbf{a}_{c,i} + \mathbf{a}_{d,i}, \quad \mathbf{a}_i|_{\Gamma_{ts,i}^-} = \mathbf{a}_{c,i}. \quad (5)$$

Với $\mathbf{a}_{c,i}$ là thành phần liên tục của trường $\mathbf{a}_i$. Các trường $\mathbf{a}_i$ và $\mathbf{a}_{d,t,i}$ là các thành phần tiếp tuyến trên biên $\Gamma_{ts,i}$. Để có được mối quan hệ nguồn SS giữa bài toán nhỏ SP q (có thể là một cuộn dây) và bài toán hiện SP p ($i \equiv p$) có thể là miền mỏng TS thông qua điều kiện tiếp giáp (ICs) với $\gamma_t = \gamma_t^\pm = \gamma_q^\pm = \gamma_p^\pm$ và $\mathbf{n}_t = -\mathbf{n}$, một miền mỏng cần được giả thiết xuất hiện trong bài toán SP q . Thật vậy, ta có [1]:

$$[\mathbf{n} \times \mathbf{h}_q]_{\gamma_q} = \mathbf{n} \times \mathbf{h}_q|_{\gamma_q^+} - \mathbf{n} \times \mathbf{h}_q|_{\gamma_q^+} = 0, \quad (6)$$

$$[\mathbf{n} \times \mathbf{h}]_{\gamma_p} = [\mathbf{n} \times \mathbf{h}_q]_{\gamma_p} + [\mathbf{n} \times \mathbf{h}_p]_{\gamma_p} = -\sigma\beta\partial_t(2\mathbf{a}_c + \mathbf{a}_d), \quad (7)$$

$$\mathbf{n} \times \mathbf{h}_p|_{\gamma_p^+} = \frac{1}{2} \left[\sigma\beta\partial_t(2\mathbf{a}_c + \mathbf{a}_d) + \frac{1}{\mu\beta} \mathbf{a}_d \right] - \mathbf{n} \times \mathbf{h}_q|_{\gamma_p^+}. \quad (8)$$

Thành phần không liên tục $[\mathbf{n} \times \mathbf{h}_q]_{\gamma_p}$ trong (7) được xác định bằng không.

Như đã phân tích ở Mục 1, sự thay đổi trong vùng dẫn từ μ_q và σ_q đối với bài toán nhỏ SP q tới μ_p và σ_p đối với bài toán nhỏ

SP p , các nguồn VSs $\mathbf{h}_{s,i}$, và $\mathbf{j}_{s,i}$ trong (2 a - b) được xác định [1]]

$$\mathbf{h}_{s,p} = (\mu_p^{-1} - \mu_q^{-1})\mathbf{b}_q, \quad (9)$$

$$\mathbf{j}_{s,p} = (\sigma_p - \sigma_q)\mathbf{e}_q, \quad (10)$$

3. PHƯƠNG TRÌNH RỜI RẠC

3.1. Công thức từ véc tơ từ thế

Từ hệ phương trình Maxwell (1a-b) và luật trạng thái (2 a-b) ở mục 2.1, phương trình rời rạc ứng với bài toán ($i \equiv q, p, k$) đối với các bài toán con SPs i được xác định thông qua định luật ampere (1a), đó là [1-5].

$$\begin{aligned} & (\mu_i^{-1} \text{curl } \mathbf{a}_i, \text{curl } \mathbf{a}'_i)_{\Omega_i} + (\sigma_i \partial_t \mathbf{a}_i, \mathbf{a}'_i)_{\Omega_i} \\ & + (\sigma_i \text{grad } v_i, \mathbf{a}'_i)_{\Omega_{c,i}} + (\mathbf{h}_{s,i}, \text{curl } \mathbf{a}'_i)_{\Omega_{c,i}} \\ & + (\mathbf{j}_{s,i}, \text{curl } \mathbf{a}'_i)_{\Omega_{c,i}} + \langle \mathbf{n} \times \mathbf{h}_i, \mathbf{a}'_i \rangle_{\Gamma_{h,i}} \\ & + \langle \mathbf{n} \times \mathbf{h}_i, \mathbf{a}'_i \rangle_{\Gamma_{b,i}} + \langle [\mathbf{n} \times \mathbf{h}_i]_{\gamma_i}, \mathbf{a}'_i \rangle_{\gamma_i} \\ & = (\mathbf{j}_{s,i}, \mathbf{a}'_i)_{\Omega_{s,i}}, \quad \forall \mathbf{a}'_i \in F_i^1(\Omega_i), \quad (11) \end{aligned}$$

Trong đó $F_i^1(\Omega_i)$ là không gian hàm được xác định trong miền nghiên cứu Ω_i , và chứa đựng hàm dạng đối với trường $\mathbf{a}_i$ cũng như là hàm thử $\mathbf{a}'_i$. Tại mức độ rời rạc, không gian hàm này được xác định bằng các phần tử cạnh. Các ký hiệu $(\cdot, \cdot)_{\Omega_i}$ và $\langle \cdot, \cdot \rangle_{\Gamma_i}$ lần lượt là các tích phân khối xác định trong Ω_i và tích phân mặt xác định trên biên Γ_i . Tích phân mặt trên biên $\Gamma_{h,i}$ được xác định như một biên đồng nhất và bằng không.

3.2. Bài toán con với miền mỏng

Trên cơ sở phương trình (7), mô hình miền mỏng [1-2] xuất hiện thông qua đại lượng không liên tục $\langle [\mathbf{n} \times \mathbf{h}_p]_{\gamma_p}, \mathbf{a}'_p \rangle_{\gamma_p}$ và được phân tích như sau:

$$\begin{aligned} \langle [n \times h_p]_{\gamma_p}, a'_p \rangle_{\gamma_p} &= \langle [n \times h_p]_{\gamma_p}, a'_c + a'_d \rangle_{\gamma_p} \\ &= \langle [n \times h_p]_{\gamma_p}, a'_c \rangle_{\gamma_p} \\ &\quad + \langle [n \times h_p]_{\gamma_p}, a'_d \rangle_{\gamma_p}, \end{aligned} \quad (12)$$

trong đó a'_d và a'_c là các hàm thử; a'_d được xác định bằng không trên biên $\Gamma_{t,p}^- = \gamma_{t,p}^-$ của miền mỏng [1-2]. Bởi vậy mà phương trình (12) được viết lại như sau:

$$\begin{aligned} \langle [n \times h_p]_{\gamma_p}, a'_p \rangle_{\gamma_p} &= \langle [n \times h_p]_{\gamma_p}, a'_c \rangle_{\gamma_p} \\ &\quad + \langle n \times h_p|_{\gamma_p^+}, a'_d \rangle_{\gamma_p^+}. \end{aligned} \quad (13)$$

Ngoài ra, đại lượng không liên tục $\langle [n \times h_p]_{\gamma_p}, a'_c \rangle_{\gamma_p}$ trong (13) được xác định thông qua (7), đó là:

$$\begin{aligned} \langle [n \times h]_{\gamma_p}, a'_c \rangle_{\gamma_p} &= \langle [n \times h_p]_{\gamma_p}, a'_c \rangle_{\gamma_p} \\ &= \langle [n \times h_p]_{\gamma_p}, a'_c \rangle_{\gamma_p} \\ &= \langle \sigma \beta \partial_t (2a_c + a_d), a'_c \rangle_{\gamma_p}. \end{aligned} \quad (14)$$

3.3. Bài toán con với miền hiệu chỉnh

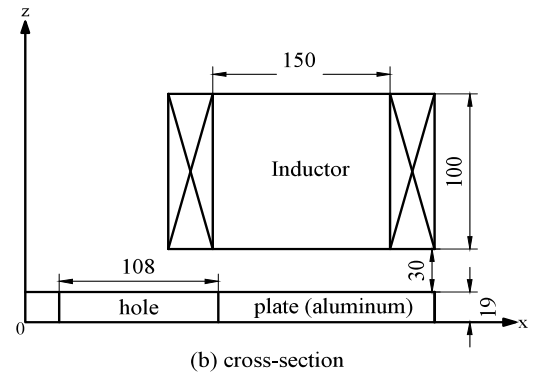
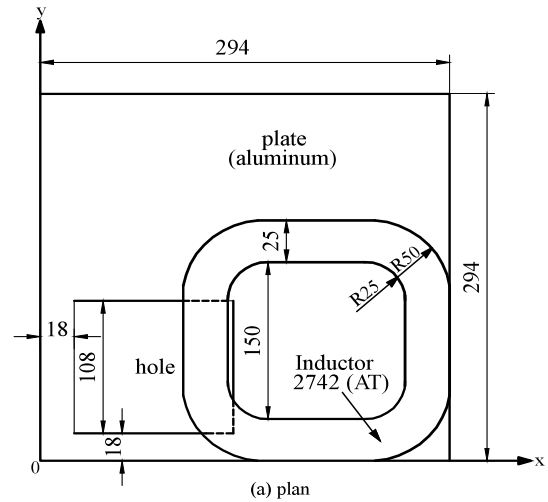
Nghiệm đạt được từ bài toán con trên miền mỏng TS (SP q và SP p) được xem xét như là các nguồn khối VS cho bài toán hiệu chỉnh SP k , trong đó các nguồn VS đã được xác định trong (7) và (8). Các nguồn này sẽ được ánh xạ từ lưới của các bài toán trước đó (SP q và SP p) lên lưới của bài toán hiệu chỉnh SP k bằng phương pháp xếp chồng [8]. Do đó, phương trình rời rạc của bài toán hiệu chỉnh SP k được viết [8]:

$$\begin{aligned} &(\mu_k^{-1} \text{curl } a_k, \text{curl } a'_k)_{\Omega_k} \\ &+ (\sigma_k \partial_t a_k, a'_k)_{\Omega_{c,k}} + (\sigma_k \text{grad } v_k, a'_k)_{\Omega_{c,k}} \\ &+ ((\mu_k^{-1} - \mu_p^{-1})(\text{curl } a_p \\ &\quad + \text{curl } a_q), \text{curl } a'_k)_{\Omega_k} \\ &\quad + \langle [n \times h_k]_{\gamma_{t,k}}, a'_k \rangle_{\gamma_{t,k}} \end{aligned}$$

$$+ (\sigma_k \partial_t (a_q + a_p), a'_k)_{\Omega_{c,k}} = 0, \quad \forall a'_k \in F_k^1(\Omega_k). \quad (14).$$

4. ÁP DỤNG VÀO BÀI TOÁN THỰC TẾ

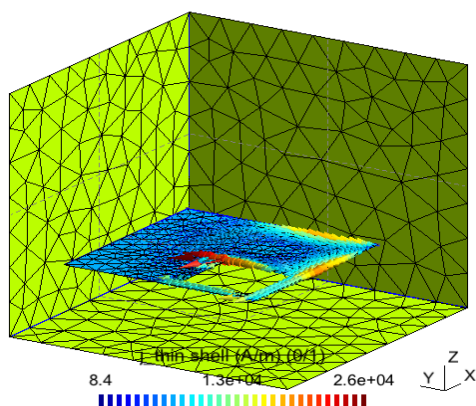
Bài toán ứng dụng là một bài toán benchmark TEAM Problem 7 [6, 10] bao gồm một cuộn dây đặt phía trên, và miền dẫn mỏng (bằng vật liệu nhôm) đặt ở dưới như mô tả trong hình 1 (đơn vị kích thước được đo bằng mm). Cuộn dây được kích thích bởi nguồn điện xoay chiều với sức từ động là 2742 A.vòng. Độ từ thẩm tương đối và độ dẫn điện của miền dẫn mỏng lần lượt được cho là: $\mu_{r,plate} = 1$, $\sigma_{r,plate} = 35.26 \text{ MS/m}$. Tần số của cuộn dây được xem xét với hai trường hợp 50 Hz và 200 Hz.



Mô hình 3D chia lưới của bài toán đầy đủ được mô tả như trong hình 2. Sự phân bố của từ trường do dòng điện chạy trong cuộn dây được biểu diễn trong hình 3.

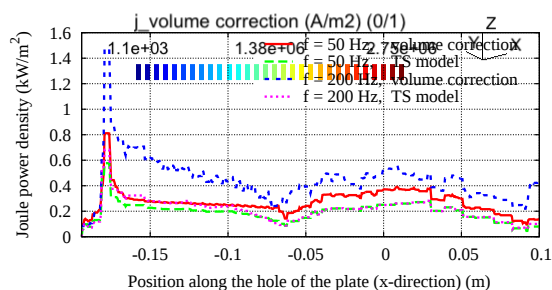
Hình 2. Mô hình chia lưới 3D.

Hình 4. Sự phân bố của dòng điện xoáy trên miền mỏng do từ trường biến thiên,



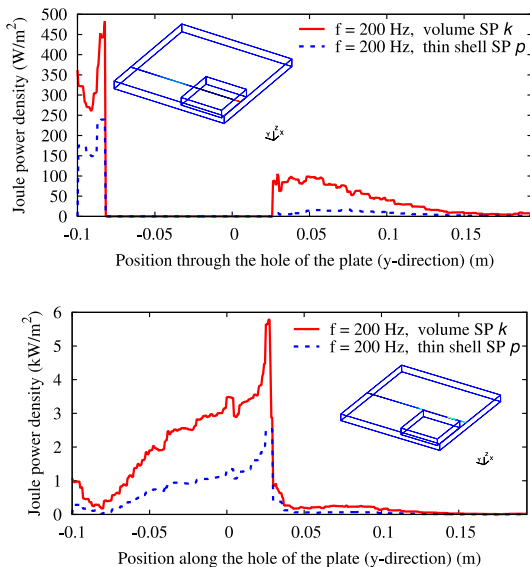
Sự phân bố của dòng điện xoáy do từ trường biến thiên trong miền mỏng gây ra được biểu diễn trong hình 4. Như đã phân tích ở phần 1, do bỏ qua hiệu ứng cạnh và góc, nên nghiệm tìm được trên miền mỏng thường gặp phải sai số và phải được xử lý/cải thiện bằng một vùng/miền hiệu chỉnh như mô tả tại hình 5.

Hình 5. Sự phân bố của dòng điện xoáy trên miền hiệu chỉnh ($\mu_{r,plate} = 1$, $\sigma_{r,plate} = 35,26$ MS/m, $f = 50$ Hz).



Hình 6 mô tả sự phân bố của mật độ tổn hao công suất dọc theo miền mỏng và miền hiệu chỉnh, ứng với tần số 50Hz và 200 Hz. Khi tần số $f = 50$ Hz, miền hiệu chỉnh “volume correction” có thể hiệu chỉnh tới 35% tại vị trí gần cạnh và góc (với độ thâm sâu bề mặt $skindepth = 11,98\text{mm}$), và hiệu chỉnh tới xấp xỉ 80% tại khu vực cạnh và

góc đối với trường hợp tần số $f = 200$ Hz
(với skindepth = 6mm).



Hình 7. Sự phân bố của mật độ tổn hao công suất dọc và ngang qua lỗ của miền mỏng và miền hiệu chỉnh, ứng với tần số 200 Hz.

Phân tích một cách tương tự, sự phân bố của mật độ tổn hao công suất dọc theo lỗ và ngang qua lỗ của miền mỏng và miền hiệu chỉnh, ứng với tần số 200 Hz được đề cập trong hình 7. Sai số đến từ miền mỏng được và được hiệu chỉnh với miền hiệu chỉnh 60% tại vùng khi đi qua lỗ và đạt tới

70% tại vị trí gần cạnh và góc của miền mỏng, với skindepth = 6mm cho cả hai trường hợp.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã áp dụng phương pháp bài toán nhỏ để phân tích, tính toán và hiệu chỉnh sai số của các đại lượng trường xuất hiện tại các khu vực gần cạnh và góc của mô hình miền dẫn có cấu trúc vỏ mỏng. Các kết quả đạt được đã khắc phục được nhược điểm của hiệu ứng cạnh và góc của miền mỏng mà các nhóm nghiên cứu trước [1] được giả thiết là bỏ qua. Tất cả các bước của phương pháp đã được trình bày và được kiểm chứng qua công thức véc tơ từ thế. Đặc biệt, phương pháp đã kiểm chứng thành công cho bài toán quốc tế benchmark TEAM Problem 7 [10].

REFERENCES

- [1] C. Geuzaine, P. Dular, and W. L  gros, "Dual formulations for the modeling of thin electromagnetic shells using edge elements," IEEE Trans. Magn., vol. 36, no. 4, pp. 799–802, 2000.
- [2] S. Koruglu, P. Sergeant, R.V. Sabariego, Vuong. Q. Dang, M. De Wulf "Influence of contact resistance on shielding efficiency of shielding gutters for high-voltage cables," IET Electric Power Applications, Vol.5, No.9, (2011), pp. 715-720.
- [3] P. Dular, Vuong Q. Dang, R. V. Sabariego, L. Kr  henb  hl and C. Geuzaine, "Correction of thin shell finite element magnetic models via a subproblem method," IEEE Trans. Magn., Vol. 47, no. 5, pp. 158 –1161, 2011.
- [4] Dang Quoc Vuong and Nguyen Duc Quang, "Coupling of Local and Global Quantities by A Subproblem Finite Element Method – Application to Thin Region Models," ISSN 1859-2171 – Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal (ASTESJ), Vol 4, no.2, 40-44

(2019).

- [5] R. V. Sabariego, "The Fast Multipole Method for Electromagnetic Field Computation in Numerical and Physical Hybrid System," Ph. D thesis, 2006, University of Liege, Belgium.
- [6] Gergely KOVACS and Miklos KUCZMANN, "Solution of the TEAM workshop problem No.7 by the finite Element Method". Approved by the International Compumag Society Board at Compumag-2011.
- [7] P. Dular, R. V. Sabariego, M. V. Ferreira de Luz, P. Kuo-Peng and L. Krahenbuhl " Perturbation Finite Element Method for Magnetic Circuits", IET Sci. Meas. Technol., 2008, Vol. 2, No.6, pp.440-446.
- [8] Vuong Q. Dang, P. Dular, R.V. Sabariego, L. Krähenbühl, C. Geuzaine, "Subproblem approach for Thin Shell Dual Finite Element Formulations," IEEE Trans. Magn., vol. 48, no. 2, pp. 407–410, 2012.
- [9] Patrick Dular, Ruth V. Sabariego, Mauricio V. Ferreira de Luz, Patrick Kuo-Peng and Laurent Krahenbuhl "Perturbation Finite Element Method for Magnetic Model Refinement of – Air Gaps and Leakage Fluxes, Vol 45, No.3, 1400-1404, 2009.
- [10] Vuong Dang Quoc and Christophe Geuzaine "Using edge elements for modeling of 3-D Magnetodynamic Problem via a Subproblem Method", Sci. Tech. Dev. J. ; 23(1) :439-445.

Giới thiệu tác giả:



Tác giả Đặng Quốc Vương nhận bằng Tiến sĩ chuyên ngành kỹ thuật điện năm 2013 tại Đại học Liege, vương quốc Bỉ. Hiện tại tác giả là Giám đốc Trung tâm TCEE, giảng viên Viện Điện, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.

Lĩnh vực nghiên cứu: mô hình hóa hệ thống điện từ sử dụng mô hình các bài toán nhỏ - ứng dụng tới các thiết bị điện từ có cấu trúc mỏng (vỏ máy biến áp, tủ điện cao trung thế, màn chắn điện từ, lá thép kỹ thuật điện...); ứng dụng phương pháp số (phương pháp phần tử hữu hạn, phương pháp sai phân hữu hạn và phương pháp phần tử biên) tính toán ảnh hưởng của điện từ trường đến thiết bị điều khiển trong hệ thống điện; ứng dụng "subproblem method" tính toán thiết kế tối ưu hóa vật liệu trong thiết bị điện.



Tác giả Nguyễn Đức Quang nhận bằng Tiến sĩ chuyên ngành kỹ thuật điện 2013 tại Đại học Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers ParisTech, Pháp. Hiện nay tác giả đang là giảng viên Khoa Kỹ thuật điện, Trường Đại học Điện lực.

Lĩnh vực nghiên cứu: mô hình hóa hệ thống điện từ, ứng dụng các phương pháp số (phương pháp phần tử hữu hạn và phương pháp tích phân hữu hạn) trong nghiên cứu máy điện và hệ thống điện, tác động của điện từ trường tương hỗ và tiết kiệm năng lượng trong thiết bị điện.