

Optimisation d'une chaîne de traction électrique : approche basée sur la métamodélisation

Mehdi DJAMI^{1,2}, Maya HAGE-HASSAN¹, Claude MARCHAND¹, Guillaume KREBS¹, Philippe DESSANTE¹,
Lamyia BELHAJ²

¹ Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, CNRS, Laboratoire de Génie Electrique et Electronique de Paris, 91192, Gif sur-Yvette, France

Sorbonne Université, CNRS, Laboratoire de Génie Electrique et Electronique de Paris, 75252, Paris, France

² Stellantis, Centre Technique de Carrières-sous-Poissy, 212 Boulevard Pelletier, 78955, Carrières-sous-Poissy, France.

mehdi.djami@centralesupelec.fr

RESUMÉ Une méthode rapide d'optimisation de la chaîne de traction d'un véhicule électrique sur cycle de conduite est proposée. Les composants pris en considération lors de la conception sont l'onduleur, la machine électrique et le réducteur. Cette méthode est basée sur le développement de métamodèles d'estimation de pertes pour les machines électriques et de modèles analytiques d'onduleurs et de réducteurs. Le cycle de conduite est pris en compte par la méthode de partitionnement de donnée par *k-means* pour réduire le nombre de points de fonctionnement considérés. Une optimisation multi-objectifs est appliquée à une étude de cas sur cycle WLTC.

Mots-clés— *Métamodélisation, optimisation, cycle de conduite, chaîne de traction électrique.*

1. INTRODUCTION

Dans le but de rester attractifs sur le marché automobile, les constructeurs automobiles cherchent toujours à optimiser leurs véhicules en termes de performances et de coût [1]. Cela dépend en grande partie du choix des composants utilisés dans le véhicule [2] ; dans le cas de la chaîne de traction électrique, les principaux composants sont l'onduleur, la machine électrique et la boîte de vitesses ou "réducteur" [3].

La modélisation des composants de la chaîne de traction nécessite des modèles souvent coûteux en temps de calcul, en fonction de la précision du modèle [4]. Une solution possible est d'utiliser des modèles de substitution pour réduire le temps de calcul global, comme dans [5] pour l'évaluation des performances électromagnétiques, ou pour le dimensionnement d'une machine électrique pour une application automobile dans [6] et [7]. Dans cet article, une approche basée sur une métamodélisation de la machine et une modélisation analytique des autres composants est proposée pour l'évaluation des pertes de la chaîne de traction électrique sur cycle de conduite.

La première partie de cet article est consacrée à la modélisation des composants de la chaîne de traction. Ensuite, l'optimisation est réalisée en tenant compte des composants existants pour le réducteur et l'onduleur, les solutions proposées pour la machine électrique seront alors adaptées à chaque combinaison de composants.

2. MODELISATION DE LA CHAINE DE TRACTION

2.1. *Métamodélisation de la machine électrique*

La modélisation de la machine électrique utilisée est basée sur [4], qui présente une procédure d'optimisation pour évaluer rapidement les performances de la machine électrique sur un cycle de conduite à l'aide d'un métamodèle par krigage. La métamodélisation consiste à remplacer un modèle coûteux en temps de calcul par une approximation mathématique permettant de réduire le temps de calcul associé. Cette méthode permet au concepteur d'évaluer rapidement les performances de la machine sur l'ensemble du cycle de conduite.

La procédure de création d'un métamodèle est présentée dans [4] et [8]. Les étapes de la construction d'un métamodèle sont résumées comme suit :

- Échantillonnage : les points d'échantillonnage doivent être bien répartis pour obtenir une bonne estimation partout dans l'espace de conception. Il existe de nombreuses méthodes d'échantillonnage telles que l'échantillonnage par latin hypercube (LHS), Sobol, ...
- Crédit de la base de données : qui consiste à évaluer les réponses exactes du modèle de calcul original aux points d'échantillonnage. Une analyse par éléments finis est utilisée dans notre cas.
- Construction du métamodèle : les paramètres internes du métamodèle, connus sous le nom d'hyperparamètres, sont déterminés et optimisés pour obtenir un métamodèle robuste.
- Test de convergence : il s'agit de comparer les réponses exactes du modèle original et celles prédictes par le métamodèle à un ensemble de points de test.

La machine sélectionnée pour cette étude est une machine synchrone à aimants permanents enterrés avec 48 encoches et huit pôles, développée sous Ansys Motor-CAD. Les matériaux et les performances de la machine sont détaillés dans [9]. Certains paramètres ne varient pas au cours du processus, ils sont déterminés dès la phase de conception préliminaire, notamment les nombres d'encoches et de pôles, la configuration du bobinage et les propriétés des matériaux.

Le tableau 1 définit les variables d'optimisation et leurs limites inférieures et supérieures respectives. L'espace de conception doit être suffisamment large pour ne pas manquer de solutions potentielles, mais relativement étroit pour donner une prédition précise avec un temps de simulation raisonnable [7]. Les variables choisies sont indiquées ci-dessous :

- Rapport de largeur d'encoche = Largeur d'encoche / pas d'encoche.
- Rapport de hauteur d'encoche = hauteur d'encoche / (profondeur d'encoche + culasse du stator).
- Diamètre du stator.
- Épaisseur de l'aimant.
- Longueur de la machine.
- Rapport de division = diamètre interne stator / diamètre externe stator.

L'utilisation de variables sans dimension donne plus de souplesse pour définir les limites de l'espace de conception. La figure 1 montre la géométrie paramétrée sur un quart de la section radiale de la machine.

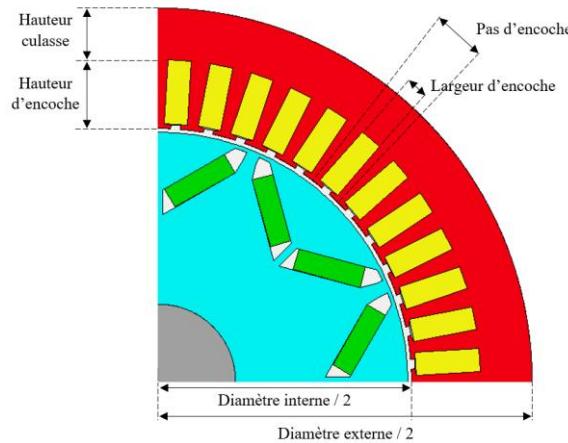


Fig. 1. Géométrie paramétrée de la machine sur Motor-CAD

Tableau 1 : Variables de conception et leur plage de variation

Variable	Variation
x_1 : largeur d'encoche / pas d'encoche	[0.7 - 0.8]
x_2 : hauteur encoche / (hauteur encoche + culasse stator)	[0.7 - 0.8]
x_3 : diamètre externe stator	[150 - 210] mm
x_4 : épaisseur d'aimants	[4.5 - 6.5] mm
x_5 : longueur machine	[130 - 210] mm
x_6 : diamètre interne stator / diamètre externe stator	[0.7 - 0.75]

Il est également nécessaire de réduire le nombre de points de fonctionnement du cycle de conduite. La méthode de partitionnement de données k-means est l'une des méthodes les plus précises pour réaliser une telle tâche [10]. La méthode consiste à regrouper les points de fonctionnement en *clusters* qui sont entièrement caractérisés par un centroïde et un poids relatif au nombre de points représentés [11]. Dans notre cas, cette méthode est appliquée au cycle WLTC avec 6 clusters comme le montre Fig. 2.

L'espace de conception est couvert par l'échantillonnage par série de Sobol [12], avec 400 échantillons contenant les six variables. La base de données nécessaire pour créer les métamodèles est ensuite obtenue en effectuant des calculs FEA pour les centroïdes obtenus par k-means, en plus de deux points

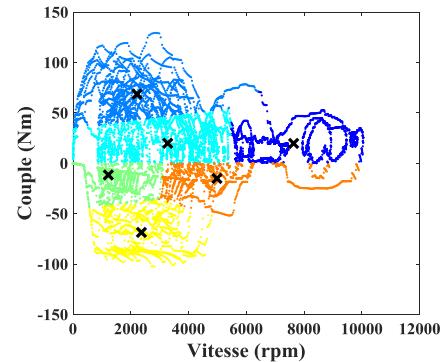


Fig. 2. Clusters et centroïdes obtenus par k-means pour le cycle WLTC

de fonctionnement représentant le couple et la vitesse maximum du cycle de conduite, afin de garantir le respect des contraintes de couple et de vitesse. L'analyse a été réalisée en 36 heures environ.

Des métamodèles pour la prédition des pertes totales sur les différents centroïdes sont créés, puis validés en comparant les réponses exactes et prédictes sur un ensemble de 50 échantillons d'essai. La comparaison montre une bonne précision des différents métamodèles. Un exemple est illustré dans les figures Fig. 3 et Fig.4 pour deux centroïdes. Le temps de calcul pour ces 50 échantillons de test avec le modèle EF est d'environ 5 heures alors qu'il faut moins d'une minute pour l'évaluation par métamodèle.

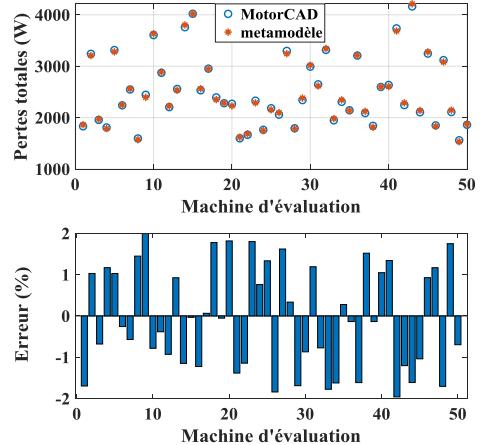


Fig. 3. Évaluation de la précision du métamodèle pour le centroïde 1

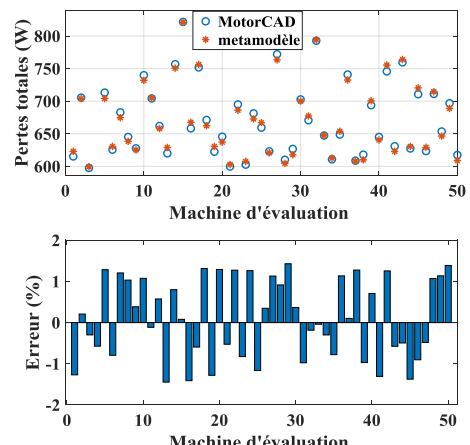


Fig. 4. Évaluation de la précision du métamodèle pour le centroïde 2

2.2. Modélisation du convertisseur de puissance

Dans ce travail, nous considérons un convertisseur à base d'IGBT, qui est largement utilisé dans les applications industrielles pour son faible coût par rapport aux autres technologies [2]. Les pertes de puissance des IGBT et des diodes peuvent être divisées en pertes par conduction et pertes par commutation. Les pertes du convertisseur peuvent être calculées par de multiples méthodes comme les méthodes de calcul analytique ou physiques [13]. Dans notre cas, un modèle analytique est utilisé pour le calcul des pertes de l'onduleur, ce qui permettra de réduire considérablement le temps de calcul nécessaire. Les pertes totales de l'onduleur sont données par (1) et (2) :

$$\begin{aligned} P_{IGBT} = & V_{T0} \cdot \frac{I_S \sqrt{2}}{2\pi} \left[1 + r \cdot \frac{\pi}{4} \cos\phi \right] \\ & + R_{T0} \cdot 2 \cdot I_S^2 \cdot \left[\frac{1}{8} + \frac{r}{3\pi} \cdot \cos\phi \right] \\ & + F_d \left(\frac{a_T}{4} \cdot \hat{I}_s^2 + \frac{b_T}{\pi} \cdot \hat{I}_s + \frac{c_T}{2} \right) \cdot \frac{E}{V_{ref}} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} P_{DIODE} = & V_{D0} \cdot \frac{I_S \sqrt{2}}{2\pi} \left[1 - r \cdot \frac{\pi}{4} \cos\phi \right] \\ & + R_{D0} \cdot 2 \cdot I_S^2 \cdot \left[\frac{1}{8} - \frac{r}{3\pi} \cdot \cos\phi \right] \\ & + F_d \left(\frac{a_D}{4} \cdot \hat{I}_s^2 + \frac{b_D}{\pi} \cdot \hat{I}_s \right. \\ & \left. + \frac{c_D}{2} \right) \cdot \frac{E}{V_{ref}} \end{aligned} \quad (2)$$

Où $E=400$ V, est la tension du bus DC, V_{ref} est la tension d'essai spécifiée dans la documentation du fabricant, F_d est la fréquence de commutation, V_{T0} , R_{T0} , V_{D0} , R_{D0} , sont obtenus à partir de la fiche technique du fabricant, et les coefficients a_T , b_T , c_T , a_D , b_D , c_D considèrent l'évolution des énergies de commutation en fonction du courant commuté.

2.3. Modélisation du réducteur de vitesse

Le dernier composant est le réducteur, qui relie directement la machine électrique aux roues du véhicule et adapte le couple et la vitesse nécessaires. Dans ce travail, un réducteur mono-rapport est considéré. Un modèle analytique est utilisé pour générer des cartographies de pertes du réducteur sur sa plage de fonctionnement, ce modèle prend en compte différents paramètres liés aux roulements, à la géométrie et à l'huile utilisée. Dans le processus d'optimisation, le réducteur est considéré directement par les points de fonctionnement du cycle de conduite, puis les pertes sont calculées séparément via les cartographies générées.

3. PROCEDURE D'OPTIMISATION

Le problème d'optimisation est résolu à l'aide de l'algorithme NSGA-II [14]. Nous cherchons à minimiser les pertes totales de la chaîne de traction sur le cycle de conduite (f_1) et le volume de la machine électrique (f_2). Pour cela, nous recherchons la meilleure solution pour la machine électrique avec différentes combinaisons d'onduleur et de réducteur. Dans ce but, nous avons sélectionné neuf modules de puissance IGBT de 3 fournisseurs ; ces choix ont été faits en tenant compte des exigences de courant et de tension maximum pour

notre application ; le tableau 2 donne les caractéristiques des différents modules de puissance choisis. De plus, trois réducteurs de rapports différents ont été sélectionnés, ce qui a un impact direct sur le couple et la vitesse de la machine électrique. Le tableau 3 donne le couple et la vitesse maximum requis pour l'exemple du cycle de conduite WLTC dans le cas d'un véhicule électrique du segment B. La formulation du problème est donnée en (3). Les variables d'optimisation représentées par le vecteur X sont détaillées dans le tableau 1.

$$\text{Min } F(X) = [f_1(X) \quad f_2(X)]$$

$$\text{S.C:} \quad T_m \leq T_{max}$$

$$\Omega_m \leq \Omega_{max} \quad (3)$$

$$f_1 = \sum_{j=1}^{\text{nb cluster}} \text{Pertes}_{mot} + \text{Pertes}_{ond} + \text{Pertes}_{red}$$

Où T_m et Ω_m sont, respectivement, le couple et la vitesse maximum de la machine. Les contraintes sur le couple maximal (T_{max}) et la vitesse maximale (Ω_{max}) sont identiques pour les trois réducteurs, afin de garantir qu'une solution optimale pour un réducteur peut être appliquée aux autres sans rencontrer de problèmes liés aux contraintes.

Tableau 2 : Convertisseurs sélectionnés pour l'étude

Onduleur	Spécifications
Onduleur 1	650 V/ 400 A
Onduleur 2	1200 V/ 600 A
Onduleur 3	650 V/ 450 A
Onduleur 4	650 V/ 600 A
Onduleur 5	1200 V/ 600 A
Onduleur 6	700 V/ 400 A
Onduleur 7	650 V/ 400 A
Onduleur 8	750 V/ 660 A
Onduleur 9	750V/ 900 A

Tableau 3 : Réducteurs choisis pour l'étude

Réducteur	Rapport de réduction	Couple maximal demandé (N.m)	Vitesse maximale demandée (rpm)
RED_1	7.9	157	8230
RED_2	9.7	131	10035
RED_3	11.9	108	12390

La procédure d'optimisation décrite est appliquée au cas d'un véhicule du segment B sur le cycle de conduite WLTC. Les figures Fig. 5, Fig. 6 et Fig. 7 illustrent les fronts de Pareto obtenus pour la minimisation des pertes d'énergie de la chaîne de traction et du volume de la machine électrique, pour les réducteurs RED_1, RED_2 et RED_3 respectivement.

Les résultats de l'optimisation ont été obtenus en moins de huit minutes pour chaque réducteur. Ce temps réduit obtenu grâce à l'utilisation des métamodèles, prouvant ainsi leur intérêt, en particulier pour les premières étapes de la conception.

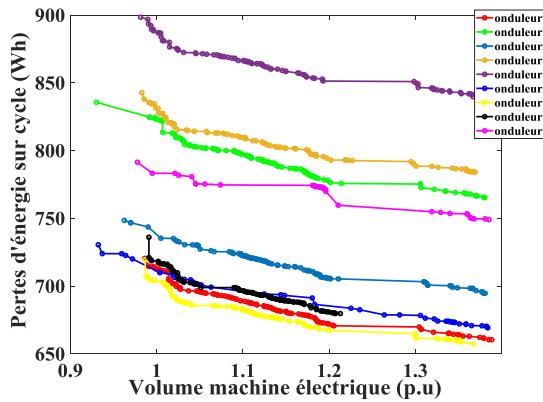


Fig. 5. Fronts de pareto obtenus pour le réducteur RED_1

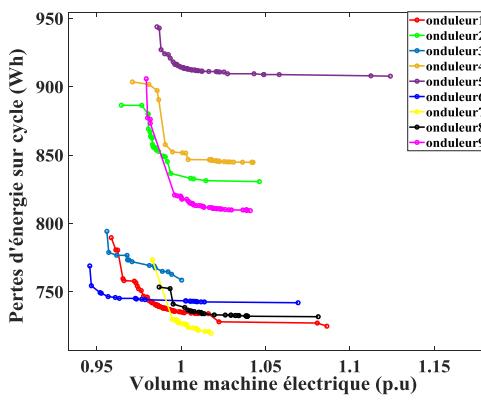


Fig. 6. Fronts de pareto obtenus pour le réducteur RED_2

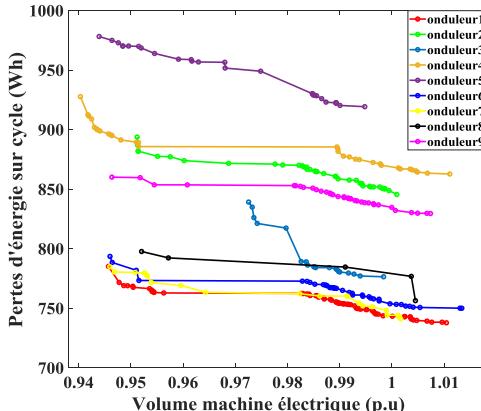


Fig. 7. Fronts de pareto obtenus pour le réducteur RED_3

Pour le même réducteur, les chaînes de traction avec les onduleurs 1 et 7 ont des courbes similaires et représentent les pertes les plus faibles sur le cycle d'entraînement WLTC ; ceci est prévisible puisque leurs modules de puissance possèdent les mêmes caractéristiques. Le volume de la machine électrique dans le cas du réducteur RED_1 atteint une valeur de 1.4 (p.u) en raison de son couple élevé, ce qui se traduit par des machines plus grandes capables de produire de telles valeurs de couple. Les chaînes de traction avec l'onduleur 5 représentent les pertes les plus élevées, ceci peut être expliqué par le fait que cet onduleur est surdimensionné pour notre application, comme l'indique le tableau 2.

Pour voir la différence entre les résultats de l'optimisation pour les trois réducteurs, nous comparons dans le tableau 4 une

solution de même volume (p.u) et pour le même onduleur, ici nous choisissons l'onduleur 4.

Tableau 2. Variation des paramètres d'optimisation en fonction du réducteur

Réducteur	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
RED_1	0.702	0.7	200.7	4.57	154.3	0.704
RED_2	0.7	0.71	175.4	5.23	175	0.7
RED_3	0.715	0.72	177	5.5	171.5	0.74

Bien qu'occupant un même volume les machines électriques présentent des paramètres géométriques différents selon les réducteurs, principalement parce qu'elles ne doivent pas satisfaire les mêmes points de fonctionnement. Cette possibilité de multiple choix de la machine électrique sera la base de travaux futurs pour envisager une conception modulaire pour une gamme de véhicules électriques.

4. CONCLUSION

Cet article présente une méthodologie d'optimisation de la chaîne de traction d'un véhicule électrique sur un cycle de conduite, en utilisant une combinaison de modèles analytiques et de métamodèles pour estimer les pertes de chaque composant. La méthode proposée fournit une solution rapide et robuste pour l'exploration de l'espace de conception et l'optimisation des chaînes de traction électriques. Cette méthodologie peut s'avérer très utile pour les concepteurs dans les premières étapes de la conception.

La présente étude a examiné une application sur cycle de conduite WLTC pour un véhicule électrique du segment B avec une machine synchrone à aimants enterrés en V et différentes technologies de réducteur et d'onduleur, afin de trouver le meilleur compromis entre les composants disponibles. Dans les travaux futurs, une approche généralisée sera développée pour la conception d'une chaîne de traction multi gamme ; elle prendra en compte davantage de variables de conception pour le moteur, davantage de technologies de composants et, enfin, davantage de cycles de conduite et de profils de véhicules. L'objectif à terme est de proposer une approche visant à optimiser le coût global des chaînes de traction pour une grande variété de véhicules en tenant compte de la modularité dans la conception, tout en garantissant un temps de calcul limité.

5. REFERENCES

- [1] B. Kabalan, E. Vinot, R. Trigui and C. Dumand, " Systematic Methodology for Architecture Generation and Design Optimization of Hybrid Powertrains ", in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 69, no. 12, pp. 14846-14857, Dec. 2020.
- [2] G. Eason, B. Noble, and I. N. Sneddon, A. Alcca-Pekarovic, P. J. Kollmeyer, P. Mahvelatishamsabadi, T. Mirfakhrai, P. Naghshtabrizi and A. Emadi, " Comparison of IGBT and SiC Inverter Loss for 400V and 800V DC Bus Electric Vehicle Drivetrains ", 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Detroit, MI, USA, 2020.
- [3] A. Schöcknecht, A. Babik and V. Rill, " Electric powertrain system design of BEV and HEV applying a multi objective optimization methodology ", 6th Transport Research Arena April 18-21, 2016.
- [4] M. Djami, M. Hage-Hassan, C. Marchand, G. Krebs, P. Dessante and L. A. Belhaj, " Kriging Metamodel for Electric Machines: A Drive Cycle Approach," 2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Valencia, Spain, 2022.
- [5] P. Akiki, M. Hage Hassan, M. Bensetti, P. Dessante, J.-C. Vannier, D. Prieto, M. McClelland, " Multiphysics Design of a V-Shape IPM Motor ", in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 33, no. 3, pp. 1141-1153, Sept. 2018.

- [6] Z. Hanic, A. Hanic, M. Kovacic, "The Application of Neural Network Metamodels Interior Permanent Magnet Machine Performance Prediction", 2021 International Conference on Electrical Drives & Power Electronics (EDPE), 2021.
- [7] N. Rivière and M. Popescu, " Multi-Physics Optimization of a High-Speed Copper Rotor Induction Motor for a Traction Application Using a Metamodel Based Approach", International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD), 2020.
- [8] R. Mazloum, S. Hlioui, L. Laurent, M. Belhadi, G. Mermaz-Rollet and M. Gabsi, " Wound Field Synchronous Drive Cycle Current Parameters Optimization: A Metamodel-Based Approach", 2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Valencia, Spain, 2022.
- [9] Lamya Abdeljalil Belhaj, " Comparison between Permanent Magnet and Wound Field Synchronous Machines for Traction Application: Efficiency and Energy Consumption ", EVS32 Symposium Lyon, France, 2019.
- [10] A. Kaloun, S. Brisset, M. Ogier, M. Ahmed, R. Vincent, " Comparison of Cycle Reduction and Model Reduction Strategies for the Design Optimization of Hybrid Powertrains on Driving Cycles ", Energies, 2021.
- [11] J. F. Cardoso, C. Chillet, L. Gerbaud, L. A. Belhaj, " Electrical Machine Design by optimization for E-motor Application: a Drive Cycle Approach ", 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2020.
- [12] C. Lataniotis, D. Wicaksono, S. Marelli, B. Sudret, " UQLab user manual – Kriging (Gaussian process modeling ", Chair of Risk, Safety and Uncertainty Quantification, ETH Zurich, Switzerland, 2021.
- [13] D. Graovac, M. Pürschel, " IGBT Power Losses Calculation Using the Data-Sheet Parameters", Infineon Application Note, V 1. 1 , January, 2009.
- [14] Y. Yusoff, M. S. Ngadiman, A. M. Zain, " Overview of NSGA-II for Optimizing Machining Process Parameters ", Procedia Engineering, Volume 15, 2011.