

Comparaison de méthodes de placement optimal des synchrophaseurs pour la localisation des défauts HTA

Trung Dung LE, Amine MOKHTARI, Alexandre BACH, Marc PETIT

Laboratoire De Génie Électrique et Électronique De Paris, CNRS, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, Sorbonne Université, Plateau de Moulon, 91192 Gif sur Yvette, France

RESUME – La réduction de l'énergie non distribuée nécessite des méthodes efficaces de localisation de défauts (MLD) dans les réseaux de distribution moyenne tension (HTA). Nos travaux précédents [1] ont introduit une nouvelle MLD qui identifie efficacement les zones de défaut à l'aide d'un nombre limité de mesures supplémentaires de type « synchrophaseurs ». Cette présente étude examine l'utilisation d'algorithmes génétiques (AG) pour le placement optimal des synchrophaseurs afin de minimiser la zone de localisation du défaut. L'analyse compare l'AG avec une approche de recherche exhaustive itérative (REI) également proposée dans nos travaux précédents [1] sur six départs HTA réalistes reconstruits à partir l'Open Data d'Enedis. Les résultats montrent que les placements optimaux des synchrophaseurs ont tendance à se situer près des nœuds d'extrémité éloignés, ce qui correspond aux attentes théoriques. La REI fonctionne bien pour les départs moins complexes, mais devient coûteuse en termes de calcul pour les feeders complexes avec de nombreux nœuds d'extrémité éloignés. L'approche AG, en particulier lorsqu'elle est limitée aux nœuds d'extrémité éloignés, démontre des résultats prometteurs en termes de qualité de la solution et d'efficacité computationnelle.

Mots-clés— Réseaux électriques, défauts HTA, localisation de défauts, placement optimal, synchrophaseurs, algorithme génétique, recherche exhaustive itérative.

1. INTRODUCTION

La localisation des défauts dans les réseaux de distribution moyenne tension (HTA) est un enjeu majeur pour garantir la fiabilité et la qualité de l'alimentation électrique. Les pannes prolongées entraînent l'augmentation de l'énergie non distribuée ainsi que des pertes économiques considérables, affectent la satisfaction des clients et peuvent avoir des conséquences sociales importantes, notamment dans les secteurs critiques. La complexité croissante des réseaux HTA, caractérisés par une structure arborescente, de nombreuses charges et de branches latérales, ainsi que l'intégration massive d'énergies renouvelables, rendent la localisation des défauts particulièrement délicate. Les méthodes traditionnelles, souvent limitées à des mesures effectuées uniquement aux postes sources, souffrent d'un manque de précision et sont sujettes à de multiples solutions possibles [2].

Pour relever ces défis, nous avons proposé dans une étude précédente [1] d'ajouter des mesures synchrophaseurs, qui sont installées dans des postes de transformation HTA/BT. Les mesures ont permis d'identifier une zone de défaut électriquement connexe de manière précise. Cependant, l'installation de synchrophaseurs dans tous les postes HTA/BT

n'est pas économiquement viable en raison de leurs coûts d'investissement élevés. Il est donc judicieux de les déployer de manière stratégique sur certains nœuds du réseau afin de minimiser la taille des zones de défaut à localiser.

Dans [1], le placement des synchrophaseurs a été basé sur une recherche exhaustive itérative (REI) parmi les nœuds extrémités du départ en défaut. La recherche identifie un ensemble de nœuds synchrophaseurs qui minimise statistiquement la taille de la zone de solution. Dans ce processus, la probabilité de défaut de chaque tronçon de ligne a été prise en compte.

Dans cette étude, nous proposons d'explorer des métaheuristiques, telles que l'algorithme génétique (GA) [3], afin d'élargir l'espace de recherche de manière plus efficace. Nous comparons ensuite les performances de ces méthodes avec celles de la recherche exhaustive, en mettant en évidence leurs avantages respectifs et leurs limites dans le contexte de notre problème.

Ce résumé est organisé de la manière suivante : la section 2 rappelle le principe de la méthode de localisation de défauts HTA étudiée ; la section 3 présente les différentes méthodes de placement optimal considérées ; la section 4 expose le cas d'étude, présente les résultats obtenus et les analyse ; enfin, la section 5 conclut en proposant des perspectives pour de futurs travaux.

2. METHODE DE LOCALISATION DE DEFAUT

Nous considérons des défauts à la terre qui présentent plus de 80% des défauts HTA. Ainsi, nous nous plaçons dans le mode « homopolaire » dans lequel les charges et de producteurs décentralisés, en raison de leur régime de neutre HTA isolé, ne contribuent pas à la circulation du courant homopolaire. Seules les impédances des lignes et câbles du réseau et l'impédance du défaut interviennent dans les calculs. La méthode de localisation de défaut, proposée dans [1], est basée sur l'estimation des tensions homopolaires : pour chaque nœud disposant d'une mesure supplémentaire de tension, deux ensembles d'estimées des tensions homopolaires (ascendantes et descendantes) sont calculés pour chaque nœud sur le chemin entre le jeu de barres HTA et la mesure supplémentaire. Ces deux ensembles sont théoriquement égaux au nœud projeté du défaut sur le chemin et sont différents pour tous les autres nœuds du chemin. Dans l'exemple de la Fig. 1, le nœud 3, étant le nœud projeté, est la projection du défaut survenu au nœud 10 sur le chemin entre le nœud 15 (jeu de barres) et le nœud 6

(nœud synchrophaseur – mesure supplémentaire). On peut donc déduire que le défaut se situe latéralement au nœud projeté par rapport au chemin, sans plus de précision. On peut donc définir, pour chaque mesure supplémentaire m_i , une zone $\Omega_{m_i}(j)$ (pour un défaut au nœud j) comprenant tous les nœuds latéraux au nœud projeté à l'intérieur de laquelle le défaut se situe (Fig. 1 montre la zone $\Omega_6(10) = \{3,7,8,9,10,11\}$ pour le cas d'exemple). En considérant M mesures supplémentaires, on peut construire la zone solution de l'algorithme de localisation par intersection de ces M zones latérales.

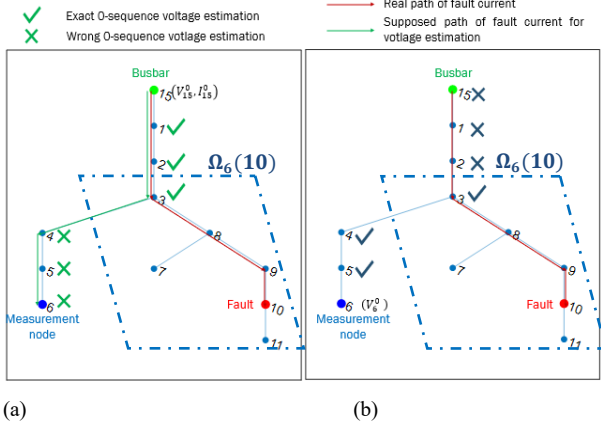


Fig. 1. Exemple de la zone solution $\Omega_6(10)$ sur le réseau CIGRE Moyenne tension (mesure supplémentaire au nœud 6 et défaut au nœud 10) ; précision des estimations de tension homopolaire descendantes (a) et ascendantes (b) sur le chemin allant du nœud 15 (jeu de barres) au nœud 6

3. METHODE DE PLACEMENT OPTIMAL

3.1. Formulation du problème

La performance de localisation de défauts de la méthode proposée dans [1] et résumée à la section 2 est directement corrélée à la taille de la zone solution, définie comme la longueur totale des lignes à l'intérieur de cette zone. Une zone de solution plus petite se traduit par un temps de recherche réduit pour les équipes de maintenance. Afin d'optimiser la performance de la MLD, un placement judicieux des points de mesure supplémentaires pour minimiser cette longueur totale est crucial. De plus, pour tenir compte de la probabilité de défaut à chaque nœud, cette probabilité est intégrée à la fonction objective $\mathbb{E}[L_{sol}^{X_M}]$ de la manière suivante :

$$\mathbb{E}[L_{sol}^{X_M}] = \sum_{j \in \text{nœuds}} L_{sol}^{X_M}(j) \mathbb{P}_{def}(j) \quad (1)$$

Où :

$L_{sol}^{X_M}(j)$ est la longueur totale des lignes à l'intérieur de la zone solution trouvée par l'ensemble X_M des M mesures supplémentaires pour le défaut au nœud j

$\mathbb{P}_{def}(j)$ est la probabilité de défaut au nœud j , déterminée en supposant que la probabilité de défaut serait 10 fois plus élevée sur les lignes aériennes que sur les câbles souterrains [1]

Le placement optimal consiste à trouver l'ensemble optimal des nœuds de mesure $\widehat{X_M}$ pour minimiser l'espérance statistique de la taille de la zone de solution $\mathbb{E}[L_{sol}^{X_M}]$:

$$\widehat{X_M} = \arg \min_{X_M} \mathbb{E}[L_{sol}^{X_M}] \quad (2)$$

Ceci peut être classé comme un problème d'optimisation combinatoire. Cet article présente une étude comparative entre deux méthodes de résolution : la recherche exhaustive itérative (REI) et l'algorithme génétique (AG), qui seront brièvement décrits ci-après.

3.2. Recherche exhaustive itérative (REI)

Dans nos travaux précédents [1], une méthode itérative et exhaustive a été utilisée pour déterminer le placement optimal des mesures $\widehat{X_M}$. Cet algorithme recherche itérativement le meilleur nœud pour ajouter une mesure, en tenant compte des mesures existantes $X_i, i \in \llbracket 0, M-1 \rrbracket$.

Pour améliorer encore l'efficacité, une stratégie de séparation et d'évaluation (branch-and-bound) est mise en œuvre. Reconnaisant que les nœuds d'extrémité éloignés fournissent généralement des mesures plus informatives que les nœuds en amont, l'espace de recherche est réduit pour ne considérer que ces nœuds comme emplacements potentiels de mesure. Cela réduit considérablement le nombre de nœuds candidats, améliorant ainsi l'efficacité computationnelle.

Cette approche itérative offre plusieurs avantages :

- **Flexibilité** : Elle permet aux gestionnaires de réseaux de placer de manière optimale les mesures de manière incrémentale, en ajoutant de nouvelles selon les besoins.
- **Complexité réduite** : Elle simplifie le problème d'optimisation en le divisant en étapes plus petites et plus faciles à gérer.

3.3. Algorithme génétique (AG)

Les algorithmes génétiques (AG) sont des algorithmes évolutionnaires inspirés des principes de la sélection naturelle. Ils fonctionnent en faisant évoluer itérativement une population de solutions candidates vers une solution optimale. Ces méthodes ont été largement utilisées pour les problèmes de placement optimal dans les réseaux électriques [3].

Les étapes clés d'un AG comprennent :

- **Initialisation** : Une population initiale de solutions candidates (par exemple, des ensembles de placements de mesures supplémentaires $\{X_{M1}, X_{M2}, X_{M3}, \dots\}$) est générée aléatoirement.
- **Évaluation** : Chaque solution de la population est évaluée sur la base de la fonction de fitness présentée dans l'équation (1), qui quantifie sa qualité.
- **Sélection** : Les solutions (par exemple, les ensembles de placements de mesures supplémentaires) ayant un fitness plus élevé sont plus susceptibles d'être sélectionnées pour la reproduction.
- **Croisement** : Les solutions sélectionnées "s'accouplent" en échangeant des parties de leur matériel génétique (par exemple, quelques nœuds de mesures supplémentaires), créant ainsi de nouvelles solutions descendantes.
- **Mutation** : Des changements aléatoires (par exemple, le remplacement de nœuds de mesures supplémentaires par d'autres emplacements potentiels) sont introduits dans les descendants pour maintenir la diversité et explorer de nouvelles régions de l'espace de solution.

Ce processus de sélection, de croisement et de mutation est répété pendant plusieurs générations, améliorant progressivement le fitness global de la population. Les AG sont efficaces pour résoudre un large éventail de problèmes d'optimisation en raison de leur capacité à explorer efficacement l'espace de solution et à éviter de rester piégés dans des optima locaux.

4. ÉTUDE COMPARATIVE DU PLACEMENT OPTIMAL DE SYNCHROPHASEURS

4.1. Départs HTA étudiés

Notre étude comparative est menée sur les six départs les plus complexes sélectionnés parmi vingt départs réalistes reconstruits à partir de l'Open Data d'Enedis [4]. Leurs principales caractéristiques sont présentées dans le Tableau 1 : nombre de nœuds, nombre de nœuds d'extrémité éloignés, longueur totale du départ L (km), et indice de ramification tel que défini dans l'équation (3).

$$ram = \frac{L}{d} \tag{3}$$

d étant la distance (en km) séparant le jeu de barres du nœud le plus éloigné dans le départ.

Tableau 1. Caractéristiques principales des départs HTA étudiés.

Número de départ	Nombre de nœuds	Nœuds de nœuds d'extrémité	Longueur L (km)	ram
Départ 15	72	26	20,51	2,19
Départ 16	75	28	25,77	1,89
Départ 17	101	43	34,38	1,97
Départ 18	181	86	66,64	3,05
Départ 19	186	74	68,83	2,33
Départ 20	211	96	75,05	3,23

Pour faciliter la comparaison, le nombre de mesures supplémentaires est fixé à six pour l'ensemble des six départs. Tous les tests sont effectués sur un ordinateur personnel doté des spécifications suivantes : un processeur Intel Core i7-1185G7 et 32 Go de RAM.

4.2. Résultats

Dans cette étude, la toolbox de l'algorithme génétique de MATLAB est utilisée. Les paramètres de l'AG sont les suivants : taille de la population = 10 ; nombre maximal de générations = 50 ; fraction de croisement = 0,9 ; et taux de mutation uniforme = 0,1.

Pour la recherche exhaustive itérative (REI), l'espace de recherche est restreint aux nœuds d'extrémité éloignés, car il a été démontré théoriquement que ces nœuds fournissent les mesures les plus pertinentes. Pour l'AG (Algorithme Génétique), deux scénarios sont considérés :

- Tous les nœuds (AG1) : L'espace de recherche englobe l'ensemble des nœuds à l'intérieur du départ.
- Nœuds d'extrémité éloignés (AG2) : L'espace de recherche est limité aux nœuds d'extrémité éloignés, de manière similaire à l'approche REI.

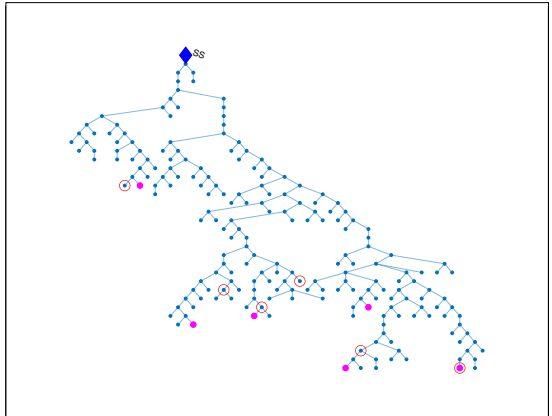
Les résultats sont d'abord présentés pour le Départ 20, le départ le plus complexe, puis résumés pour l'ensemble des six départs.

4.2.1. Départ 20

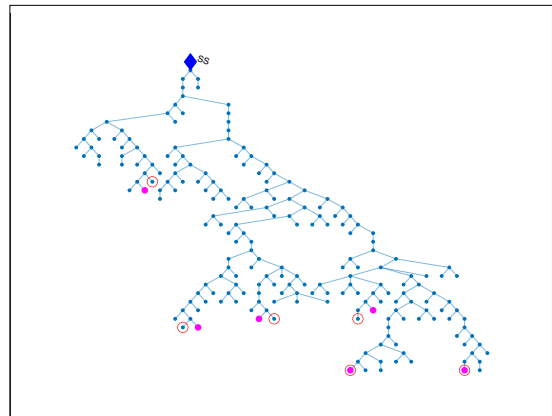
Le Départ 20 est le départ le plus grand et le plus long, comprenant 211 nœuds, 96 nœuds d'extrémité éloignés et une longueur totale de ligne de 75,05 km. Il présente également le degré de ramification le plus élevé, avec un indice de ramification de 3,23.

La Figure 2 illustre le placement optimal de six synchrophaseurs :

- La sous-figure 2a compare les résultats de la REI, représentés par des nœuds magenta, et ceux de l'AG1, indiqués par des cercles rouges. Malgré un espace de recherche plus vaste, l'AG1 identifie efficacement les nœuds optimaux, avec trois sur six coïncidant avec des nœuds d'extrémité éloignés. Il est à noter qu'un de ces trois nœuds s'aligne également avec le résultat de la REI. Les trois autres nœuds optimaux identifiés par l'AG1 sont situés à proximité immédiate des extrémités éloignées, ce qui corrobore notre précédente découverte théorique selon laquelle les extrémités éloignées fournissent les mesures de tension les plus informatives [1].
- La sous-figure 2b compare les résultats de la REI et de l'AG2. Parmi les six nœuds optimaux identifiés par AG2, deux coïncident avec les résultats REI, tandis que les quatre autres sont situés à proximité immédiate des nœuds identifiés par la REI.



a) Résultats de la REI (nœud magenta) et de l'AG1 (cercle rouge)



b) Résultats de la REI (nœud magenta) et de l'AG2 (cercle rouge)

Fig. 2. Placement Optimal des synchrophaseurs : Comparaison de la REI, de l'AG1 (Tous les Nœuds) et de l'AG2 (Nœuds d'Extrémité) - Cas du Départ 20

Les résultats en termes de valeurs minimales de la fonction de fitness $\min E[L_{sol}^{XM}]$ et de temps de calcul sont présentés dans le Tableau 2. Comme prévu, l'approche REI produit la zone de solution statistiquement la plus petite $\min E[L_{sol}^{XM}] = 0,0170$. Cependant, en raison du grand nombre de nœuds d'extrémité éloignés, cette approche entraîne le temps de calcul le plus élevé (148 secondes). L'approche AG1 ne fournit qu'une solution localement optimale, mais l'atteint dans un temps de calcul plus court de 85 secondes. L'approche AG2 semble être l'option la plus prometteuse pour ce départ. Elle fournit une solution avec la plus petite zone de solution tout en affichant également le temps de calcul le plus court (70 secondes).

Tableau 2. Performance des différentes méthodes de placement – Départ 20.

Méthode	$\min E[L_{sol}^{XM}]$	Temps de calcul (s)
REI	0.0170	148
AG1 (tous les noeuds)	0.0193	85
AG2 (noeuds d'extrémité)	0.0170	70

4.2.2. Tous les six départs

Cette sous-section présente une étude comparative de trois approches – REI, AG1 et AG2 – sur l'ensemble des six départs (du Départ 15 au Départ 20). La Figure 3 illustre les valeurs optimales de la fonction de fitness atteintes par chaque approche.

Bien que les valeurs minimales de la fonction de fitness $E[L_{sol}^{XM}]$ soient relativement proches pour toutes les approches, l'AG1 montre une tendance à converger vers des optima locaux, en particulier dans les départs les plus complexes (Départs 18, 19 et 20). En revanche, l'AG2 démontre une tendance plus marquée vers l'optimum global, ses valeurs minimales de fonction de fitness s'alignant étroitement avec celles obtenues par l'approche REI.

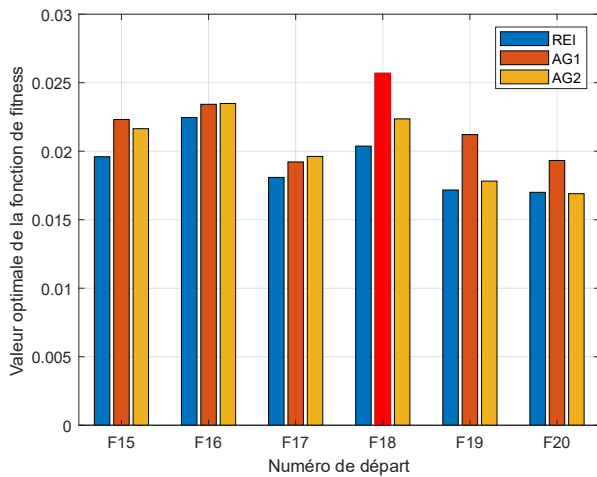


Fig. 3. Comparaison des valeurs optimales de la fonction de fitness REI (bleu), AG1 (tous les nœuds - rouge) et AG2 (nœuds d'extrémité éloignés - jaune) ; Étude de cas : Départs 15 à 20.

La Figure 4 présente une comparaison des temps de calcul pour les trois approches – REI, AG1 et AG2 – sur les Départs 15 à 20. Pour ces trois méthodes, le temps de calcul augmente généralement avec la complexité du départ.

Bien que l'approche REI affiche des temps de calcul légèrement inférieurs pour les départs moins complexes

(Départs 15-17), sa charge computationnelle augmente significativement pour les départs plus complexes (Départs 18-20). Cette augmentation peut être attribuée à la recherche exhaustive effectuée par la REI sur un plus grand nombre de nœuds d'extrémité éloignés dans ces départs plus complexes. Il est à noter que l'approche AG2, avec son espace de recherche réduit aux nœuds d'extrémité éloignés, démontre constamment des temps de calcul légèrement inférieurs à ceux de l'AG1.

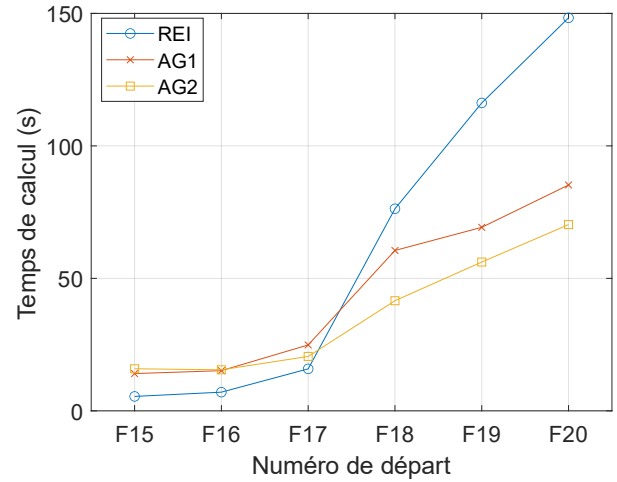


Fig. 4. Comparaison des temps de calcul : REI, AG1 (Tous les Nœuds) et AG2 (Nœuds d'Extrémité Éloignés) - Étude de Cas : Départs 15 à 20.

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cet article présente une étude comparative de différentes méthodes pour le placement optimal de mesures supplémentaires. L'objectif est de minimiser la taille attendue de la zone solution de défaut, déterminée par notre méthode de localisation de défaut basée sur la tension [1]. Cette étude compare une recherche exhaustive itérative (REI) parmi les nœuds d'extrémité éloignés avec un algorithme génétique (AG) implémenté dans deux scénarios : l'espace de recherche comprend tous les nœuds du réseau (AG1) et l'espace de recherche est limité aux nœuds d'extrémité éloignés (AG2). L'analyse utilise six départs réalistes reconstruits à partir de l'Open Data d'Enedis. Les résultats indiquent que les placements optimaux de mesures supplémentaires ont tendance à se situer près des nœuds d'extrémité éloignés, ce qui correspond à l'attente théorique selon laquelle ces nœuds fournissent des mesures de tension plus informatives.

La méthode REI démontre une grande efficacité pour les feeders moins complexes avec un nombre réduit de nœuds d'extrémité éloignés, atteignant constamment l'optimum global avec un coût de calcul relativement faible. Cependant, le temps de calcul augmente considérablement pour les feeders plus complexes avec un plus grand nombre de nœuds d'extrémité éloignés. L'approche AG2, en limitant l'espace de recherche aux nœuds d'extrémité éloignés, offre une alternative prometteuse. Elle permet d'obtenir des solutions quasi optimales tout en réduisant considérablement le temps de calcul par rapport à AG1.

Les travaux futurs se concentreront sur :

- Le réglage des paramètres : mener une étude paramétrique pour optimiser les paramètres de l'AG afin d'améliorer les performances.

- L'exploration d'autres heuristiques : étudier d'autres algorithmes heuristiques, tels que l'optimisation par essaim de particules (PSO), et comparer leurs performances avec celles de l'AG.
- L'intégration des caractéristiques du réseau : prendre en compte l'impact des indicateurs de passage de défaut, des interrupteurs et d'autres caractéristiques du réseau sur le placement optimal des mesures supplémentaires.

6. REMERCIEMENTS

Cette étude a bénéficié d'un financement de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) dans le cadre du programme France 2030, sous la référence ANR-22-PETA-0012

7. REFERENCES

- [1] A. Bach, T. D. Le, et M. Petit, « Sensitivity assessment of a novel earth fault location method with optimally placed distributed measurements for MV networks », *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 17, no 6, p. 1358-1367, 2023.
- [2] P. Stefanidou-Voziki, N. Sapountoglou, B. Raison, and J. L. Dominguez-Garcia, 'A review of fault location and classification methods in distribution grids', *Electric Power Systems Research*, vol. 209, p. 108031, Aug. 2022
- [3] P. Riyas and S. A. Lakshmanan, "Comparative Analysis of Algorithms for the Optimum Placement of PMUs in Power Systems," *2023 IEEE IAS Global Conference on Renewable Energy and Hydrogen Technologies (GlobConHT)*, Male, Maldives, 2023, pp. 1-7
- [4] F. G. Venegas, « Electric vehicle integration into distribution systems : Considerations of user behavior and frameworks for flexibility implementation », phdthesis, Université Paris-Saclay, 2021.