

Modélisation du couplage du circuit d'écoulement de l'onde de choc de foudre dans le réseau électrique haute tension : Application au poste haute tension 220 KV de Lingwala (Kinshasa)

[Coupling modeling of wave flow circuit of lightning impact in the high voltage electric network : Application in the high voltage 220 KV of Lingwala (Kinshasa)]

Mwanamputu Mbwanzo Clément, Nsongo Timothée, Pasi Bengi Masata André, and Flory Lidinga Mombonda

Institut Supérieur des Techniques Appliquées (ISTA), Kinshasa, RD Congo

Copyright © 2021 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: This publication analyzes the problem of the coupling of lightning and the power transformer in the High Voltage substations of electrical networks during the injection of lightning current to the ground in sites with strong thunderstorm activity, in this case the Democratic Republic of the Congo.

Although the aggressive overvoltage induced by lightning is short-lived, its amplitude and frequency greatly disturb the stability in terms of voltage and the continuity of service of the network, especially in its transport part often exposed to open air.

During the flow of this shock wave to the earth, through the protection devices (surge arrester) and the earth network, the transient impedance of the substation earth electrode varies suddenly depending on the amplitude of the current flow and the nature of the ground, and reveals around it a potential difference called step voltage and touch voltage, due to the distribution of the electric field, which expose the direct environment of the substation to the danger of electrocution and substation equipment against overvoltage.

This publication aims to synthesize the corrector (regulator) which will have to dampen and reject the shock of the flowing current and prevent the potential difference around the earth electrode from reaching deadly values for operators and people residing in the environment close to the substation and facilitated flow through the earth electrode.

KEYWORDS: modeling, coupling, circuit, flow, shock wave, lightning, electrical network.

RESUME: Cette publication analyse la problématique du couplage de la foudre et le transformateur de puissance dans les postes Haute Tension de réseaux électriques lors de l'injection du courant de foudre au sol dans les sites à forte activité orageuse à l'occurrence la République Démocratique du Congo.

Bien que la surtension agressive induite par la foudre soit de courte durée, son amplitude et sa fréquence perturbent fortement la stabilité sur le plan de tension et de la continuité de service du réseau surtout dans sa partie transport souvent exposée à l'air libre.

Lors de l'écoulement de cette onde de choc à la terre, au travers de les organes de protection (parafoudre) et le réseau de terre, l'impédance transitoire de la prise de terre du poste varie brutalement en fonction de l'amplitude du courant écoulé et de la nature du sol, et fait apparaître autour d'elle une différence de potentielle dite tension de pas et tension de toucher, due à la répartition du champ électrique, qui expose l'environnement direct du poste au danger d'électrocution et des équipements du poste contre la surtension.

Cette publication vise à synthétiser le correcteur (régulateur) qui devra amortir et rejeter le choc du courant écoulé et empêcher que la différence de potentielle autour de la prise de terre n'atteigne pas des valeurs mortelles pour les exploitants et les personnes résidant dans l'environnement proche du poste et facilité l'écoulement à travers la prise de terre.

MOTS-CLEFS: modélisation, couplage, circuit, écoulement, onde de choc, foudre, réseau électrique.

1 INTRODUCTION

La foudre est dangereuse non seulement parce qu'elle risque de tomber directement sur un individu ou une installation, mais aussi parce que, lorsqu'elle tombe au voisinage d'une personne celle-ci peut être électrisée par la tension de pas que la foudre engendre.

Cette tension est liée au fait qu'une source de courant créée en un point d'impact est responsable d'un champ électrique au sol, donc d'une tension, qui varie en fonction de la distance à la source : entre deux points différents en contact avec le sol, séparés d'une distance appelée pas, existe donc une différence de potentiel, ou tension de pas, d'autant plus élevée que le pas est important. Lors d'un foudroiement la tension de pas peut atteindre plusieurs milliers de volts et donc être dangereuse pour le corps humain par suite du courant électrique dont il devient le siège

2 MODÉLISATION DU CIRCUIT D'ÉCOULEMENT DE L'ONDE DE CHOC DU POSTE HT

2.1 MODÈLE DU COURANT DE FOUDRE [1] [2]

L'écoulement d'un courant électrique variable $I(t)$ est la source d'un champ magnétique H qui, à une distance r de la source, conformément à la loi d'**Ampère**, vaut :

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (1)$$

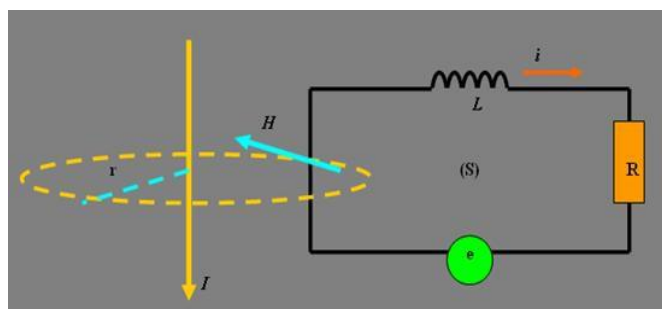


Fig. 1. Principe du couplage inductif

Lorsque ce champ coupe un circuit conducteur fermé, il crée à ses bornes une tension induite e égale au taux de variation dans le temps du flux F du champ H à travers la surface du circuit S selon la loi de **faraday** :

$$e = - \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

Avec : $\phi = \mu HS$

La f.e.m induite devient :

$$e = - \frac{\mu S}{2\pi r} \frac{di}{dt} \quad (3)$$

L'équation (3) montre que La tension induite dans le circuit dépend donc du courant perturbateur par l'intermédiaire de di/dt .

Dans le cas d'un éclair situé dans un plan parallèle à la surface considérée, les conséquences du champ électromagnétique perturbateur induisent une tension évaluée selon l'expression [A] :

$$U = \frac{S \mu}{2\pi R} \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (4)$$

Avec :

- S : surface de la boucle en m²,
- R : distance entre l'éclair et la boucle en m,
- μ : Perméabilité du vide
- i : Courant de foudre (A),

D'autre part, La théorie montre et l'expérience le confirme que la forme du courant de décharge de la foudre a une évolution temporelle de la forme [3] :

$$I(t) = I_0 [\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)] \tag{5}$$

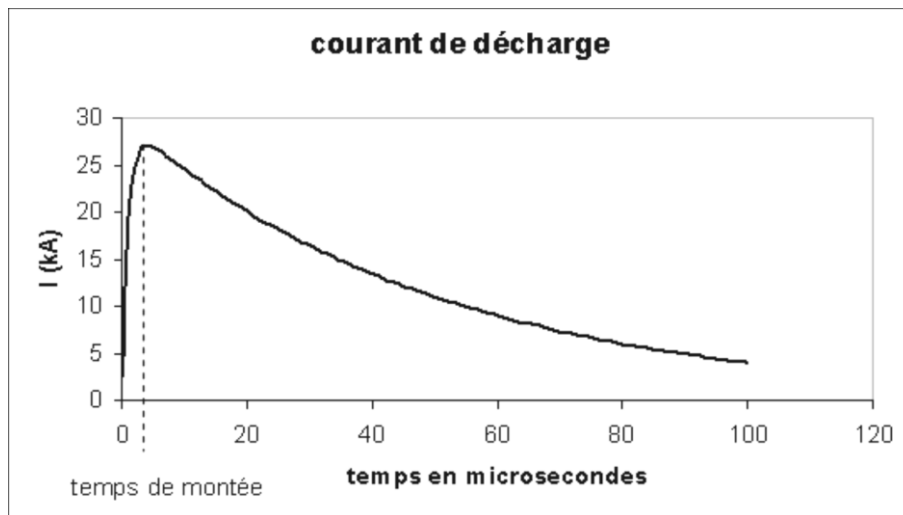


Fig. 2. Allure du courant de foudre

Avec cette loi de l'évolution du courant source, l'équation de Faraday permet de calculer la tension induite dans le circuit :

$$e(t) = -\frac{\mu I_0}{2\pi r} [\beta \exp(-\beta t) - \alpha \exp(-\alpha t)] \tag{6}$$

Les effets du courant de foudre dans le transformateur de puissance peuvent se manifester au primaire ou au secondaire de celui-ci, avec R, L comme paramètres de la branche série, la tension induite dans cette branche peut s'écrire sous la forme :

$$u = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \tag{7}$$

En comparant (5) et (7) on a :

$$Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} = e(t) = -\frac{\mu I_0}{2\pi r} [\beta \exp(-\beta t) - \alpha \exp(-\alpha t)] \tag{8}$$

Après intégration de l'équation (8), on obtient :

$$i(t) = \frac{\mu I_0 S}{2\pi r} \left[\left(\frac{\beta}{R-\beta L} - \frac{\alpha}{R-\alpha L} \right) \exp\left(-\frac{R}{L}t\right) + \frac{\alpha}{R-\alpha L} \exp(-\alpha t) - \frac{\beta}{R-\beta L} \exp(-\beta t) \right] \tag{9}$$

Pour obtenir la transmittance du courant de la foudre, la comparaison des équations (6) et (8) dans le domaine fréquentiel donne:

$$(R + Ls)I = -\frac{\mu I_0 S}{2\pi r} \left[\beta \frac{1}{s + \beta} - \alpha \frac{1}{s + \alpha} \right] \tag{10}$$

$$I(s) = \frac{\mu I_0 S}{2\pi r L} \left[\frac{\beta(s+\alpha) - \alpha(s+\beta)}{(s+\alpha)(s+\beta)(s+\frac{R}{L})} \right]$$

Pour modéliser le phénomène de couplage, nous considérons le circuit d'écoulement de l'onde de foudre comme un système asservi dont la référence ou la consigne est la tension de pas V_{pco} dans les conditions normales, le courant de foudre i_f comme une entrée secondaire en terme de perturbation et la réponse du système V_{ps} étant la répartition du potentiel autour de la prise de terre du poste HT lors de l'écoulement du courant de foudre au sol.

Sachant que le circuit d'écoulement de l'onde de choc est constitué du fil de garde comme organe de détection, du parafoudre organe de protection et le réseau de terre du poste HT qui est la dernière étape du circuit d'écoulement de l'onde, le transformateur de puissance du poste HT quant à lui, par induction est couplé avec le circuit de l'onde de choc.

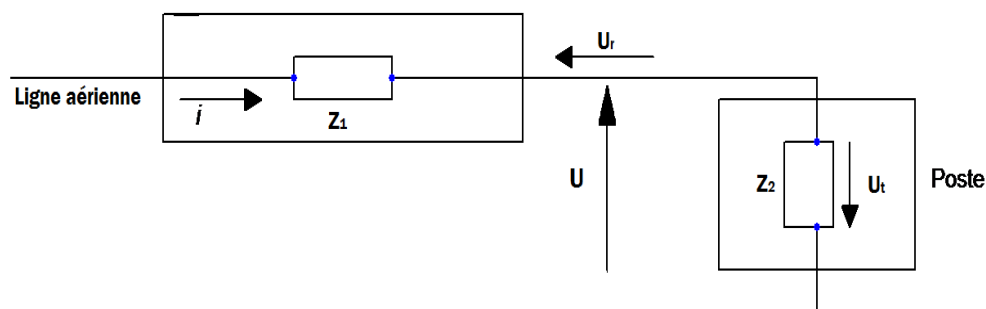


Fig. 3. Principe de la propagation de la surtension de la foudre de la ligne vers le poste HT

Le système ainsi constitué aura comme excitation, le courant de décharge de foudre et comme réponse, la différence de potentiel c.a.d le champ électrique autour de la prise de terre du poste.

2.2 MODÈLE DU FIL DE GARDE [4]

Lorsque la foudre d'intensité i frappe une ligne de garde celle-ci va véhiculer dans une des directions l'intensité $i/2$. Le fil de garde est relié à la terre via un câble d'inductance L traversant le pylône et une résistance en série R de valeur très faible.

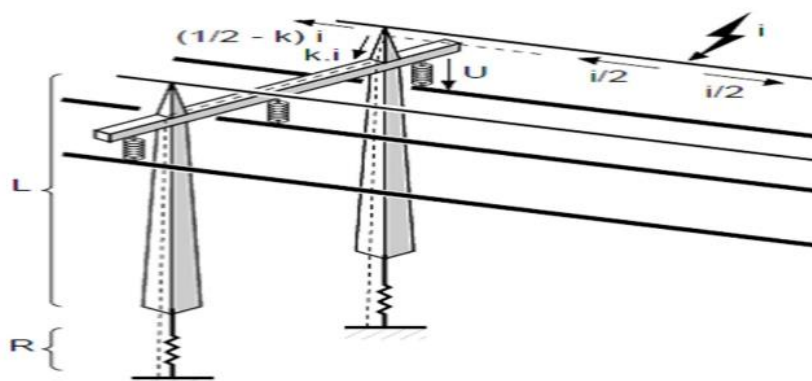


Fig. 4. Coup de foudre tombant sur le câble de garde

La traversée du courant par la liaison à la terre va créer à ses bornes (entre la tête du pylône et la terre) une différence de potentiel U conformément à l'équation (7).

Dans le domaine fréquentiel, cette expression devient, dans les conditions initiales devient

$$U(s) = RI(s) + Ls I(s) - I(0)$$

La fonction de transfert du conducteur de garde devient :

$$F_1(s) = \frac{I(s)}{U(s)} = \frac{1}{R+Ls} \tag{11}$$

$F_1(s)$ est le modèle du câble de garde.

Les valeurs numériques de $R=0,07 \Omega$ et $L=1,01 \text{ mH}$ sont données dans le tableau des caractéristiques de la ligne 220 kV du réseau interconnecté Ouest de la SNEL/RDC, tronçon poste de Kimwenza et poste de Liminga en annexe.

$$F_1(s) = \frac{1}{0,07+s} \tag{12}$$

2.3 MODÈLE DU TRANSFORMATEUR DU POSTE HT EN SURTENSION [5]

Pour l'étude du phénomène de surtension transmise au transformateur du poste HT par couplage avec le circuit d'écoulement, on se limite à un schéma équivalent d'un enroulement du côté haute tension conformément à la figure ci-dessous.

En négligeant les résistances des enroulements et la transmission des phénomènes transitoires d'un enroulement à un autre.

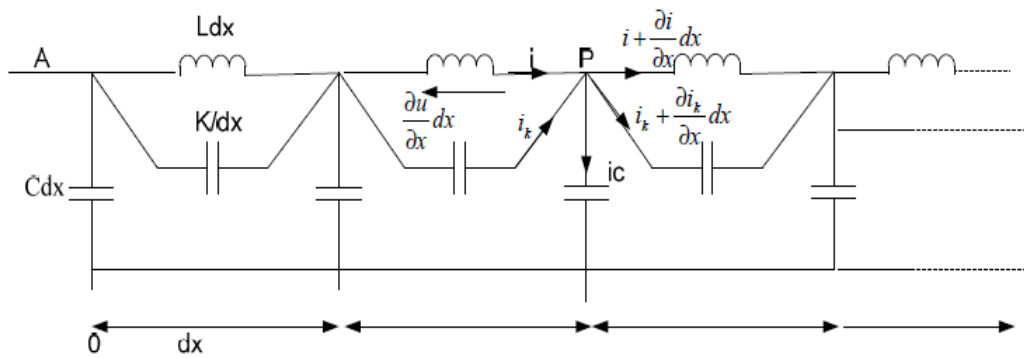


Fig. 5. Schéma équivalent d'une phase du transformateur en surtension

L'application de l'équation de Kirchoff au nœud P sur la figure 5 donne :

$$i + i_k - \left(i' + \frac{\partial i'}{\partial x} dx \right) - \left(i'_k + \frac{\partial i'_k}{\partial x} dx \right) - ic = 0 \tag{13}$$

D'où :

$$i_c = - \frac{\partial (i' + i'_k)}{\partial x} dx$$

Et que par définition :

$$i_c = -c \frac{\partial u}{\partial t} dx \tag{14}$$

En égalant (13) et (14) donne :

$$\frac{\partial (i' + i'_k)}{\partial x} = -c \frac{\partial u}{\partial t} \tag{15}$$

Sur la capacité $\frac{k}{dx}$ du schéma équivalent ci-dessus on a la relation :

$$i_k = - \frac{k}{dx} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} dx \tag{16}$$

D'où :

$$i_k = -c \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t}$$

$$\frac{\partial i_k}{\partial x} = -c \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \quad (17)$$

Sur l'inductance L, on a comme relation :

$$\frac{\partial u}{\partial x} dx = -L dx \frac{\partial i}{\partial t}$$

D'où :

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -L \frac{\partial i}{\partial t} \text{ et } \frac{\partial i}{\partial t} = -\frac{1}{L} \frac{\partial u}{\partial x} \quad (18)$$

La multipliant le dernier terme de l'équation (18) par $\frac{\partial t}{\partial x}$, donne

$$\frac{\partial i}{\partial x} = -\frac{1}{L} \frac{\partial u \partial t}{\partial x^2} \quad (19)$$

(17) + (19) donne :

$$\frac{\partial(i+i_k)}{\partial x} = -\frac{1}{L} \frac{\partial u \partial t}{\partial x^2} - c \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \quad (20)$$

Posons : $i + i_k = i_a$

et multiplions les deux membres de (20) par $\frac{\partial x}{\partial t}$

On obtient :

$$\frac{\partial i_a}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} = -\frac{1}{L} \frac{\partial u \partial t}{\partial x^2} \frac{\partial x}{\partial t} - c \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \frac{\partial x}{\partial t} \text{ et } \frac{\partial i_a}{\partial t} = -\frac{1}{L} \frac{\partial u}{\partial x} - c \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \frac{\partial u}{\partial x}$$

Sachant que :

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial x}, \text{ on a : } \frac{\partial i_a}{\partial t} = -\frac{1}{L} \frac{\partial u}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial x} - c \frac{\partial u}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial x}$$

$\frac{\partial x}{\partial t}$ étant la vitesse de propagation de la surtension dans le transformateur V.

On a :

$$\frac{\partial i_a}{\partial t} = -\frac{1}{V} \left[\frac{1}{L} \frac{\partial u}{\partial t} + c \frac{\partial^3 u}{\partial t^3} \right] \text{ et } V \frac{\partial i_a}{\partial t} = -\frac{1}{L} \frac{\partial u}{\partial t} - c \frac{\partial^3 u}{\partial t^3}$$

En régime fréquentiel, l'équation ci-dessous devient : $VsI_a(s) = -\frac{1}{L}sU(s) - cs^3U(s)$

$$F_2(s) = \frac{U(s)}{I(s)} = \frac{-V}{L+cs^2} \quad (21)$$

$F_2(s)$ est le modèle du transformateur de puissance en surtension. Les valeurs numériques de L et C sont obtenues lors de l'essai à vide du transformateur ; ce qui est pratiquement difficile pour un transformateur opérationnel. Dans ces conditions, nous retenons les ordres de grandeurs suivants, valables pour des transformateurs de réseaux HT et THT selon le J.-L. Lilien dans son cours de transport et distribution de l'énergie électrique 1999/2000 ; $Ru, pu = 0,01 pu$; $Xu, pu = 0,04$ à $0,18$; ; $Xl = 0,1$ à $0,2$

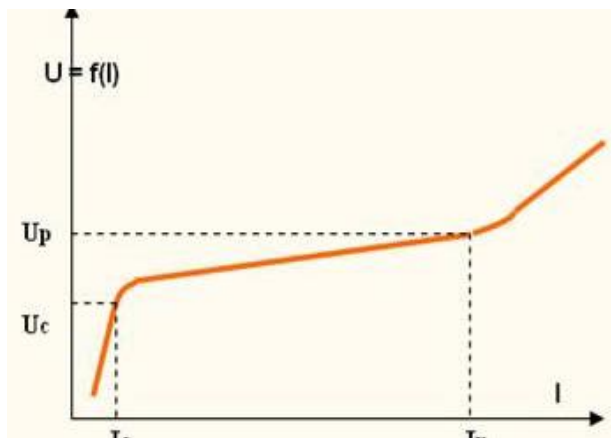


Fig. 7. Caractéristique $U=f(i)$ de la varistance

Dans cette zone linéaire comprise entre U_c et U_p , la caractéristique prend la forme : $y = ax$

La caractéristique ci-dessus permet d'écrire :

$$I = KV$$

Avec : $K = \frac{U_p - U_c}{I_c - I_n}$ étant la pente de la droite et V une différence de potentiel

On peut donc écrire :

$$i(t) = K \frac{dv}{dt} \quad (24)$$

En fréquentiel, on a :

$$I(s) = \frac{K}{s} U(s)$$

$$F_3(s) = \frac{I(s)}{U(s)} = \frac{K}{s} \quad (25)$$

Pour la protection des transformateurs HT contre les chocs de la foudre, les constructeurs (ABB, Schneider, Legrand, etc...) donnent les valeurs de U_c , U_p , I_c et I_n .

A cet effet, pour l'exploitation des postes HT 220 kV on a : niveau d'isolement : 1050 kV ; U_p : 245 kV ; U_c : 225 kV ; I_n : 20 kA ; I_c : 100 kA, le coefficient K devient :

$$K = \frac{U_p - U_c}{I_c - I_n} = \frac{245 - 225}{100 - 20} = 0,25$$

Finalement, la fonction de transfert moyennant les hypothèses évoquées ci-dessus devient :

$$F_3(s) = \frac{I(s)}{U(s)} = \frac{0,25}{s} \quad (26)$$

$F_3(s)$ est le modèle du parafoudre

2.5 MODÈLE DU RÉSEAU DE TERRE DU POSTE HT [7]

Dans un réseau de transmission de l'énergie électrique doté de lignes et postes HT, les mises à la terre sont réalisées sous plusieurs formes :

- Systèmes de mise à la terre simple, électrode simple.
- Systèmes de mise à la terre complexes, telles que les grilles de terre importante des poste ht

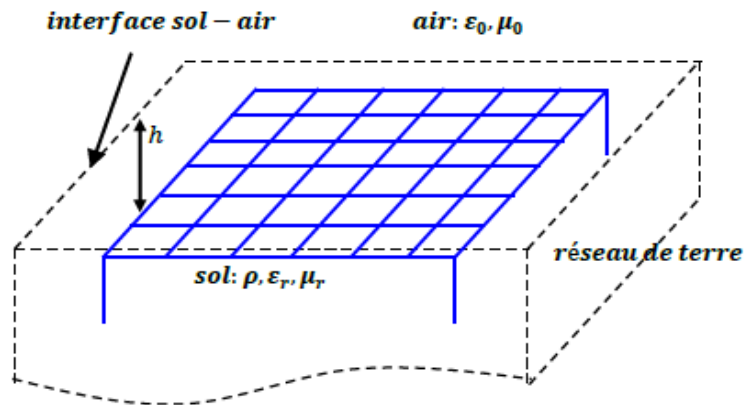


Fig. 8. Grille de mise à la terre du poste HT

Du point de vue théorique, plusieurs modèles numériques ont été développés pour l'analyse transitoire des systèmes de mise à la terre parmi lesquels nous avons:

- Modèle des circuits équivalents ;
- Modèle hybride ;
- Modèle des lignes de transmission ;
- Modèle électromagnétique ;
- Méthode des éléments finis ;
- Méthode des moments.

Lors de l'écoulement du courant de foudre au sol, on observe une répartition de la différence de potentielle autour de la prise de terre due à la propagation du champ électrique conformément à la théorie de Maxwell- Gauss.

De ce qui précède, la grille de mise à la terre du poste est assimilée à une ligne de transmission caractérisée par une grandeur d'entrée (le courant de foudre) et une grandeur de sortie (la différence de potentielle autour de la prise de terre).

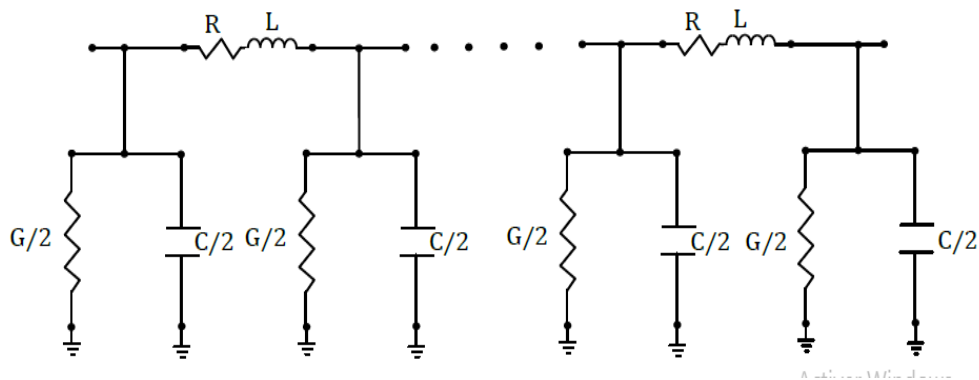


Fig. 9. Modèle des lignes de transmission

La modélisation de la propagation du courant de foudre à travers la grille de mise à la terre doit donc utiliser une description de la ligne de transmission par constantes réparties grâce aux expressions suivantes :

$$\frac{\partial i}{\partial t} = Gu(x, t) + C \frac{\partial u}{\partial t} \tag{27}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = Ri(x, t) + L \frac{\partial i}{\partial t} \quad (28)$$

Hypothèse :

Le réseau de terre de postes HT étant local et de faibles dimensions, nous pouvons admettre que l'écoulement du courant dans sol se fait principalement par les éléments transversaux ; le courant et la répartition du potentiel autour de la prise de terre sont faiblement liés à la variable x.

Ainsi :

Seule l'équation (29) et la variable temps sont prises en compte. L'expression (28) devient :

$$\frac{\partial i}{\partial t} = Gu(t) + C \frac{\partial u}{\partial t}$$

La transformée de Laplace donne :

$$sI(s) = GU(s) + CsU(s)$$

$$F_4(s) = \frac{U(s)}{I(s)} = \frac{s}{G+Cs} \quad (29)$$

$F_4(s)$ est le modèle de la grille de mise à la terre du poste HT

G et C sont les paramètres transversaux du réseau interconnecté (grille de mise à la terre du poste) dont les valeurs numériques sont obtenues par des hypothèses suivantes :

- Le sol est homogène et ses paramètres caractéristiques ε, μ et ρ sont des constantes ;
- Les armatures du condensateur ainsi formé sont les différentes couches du sol et la grille de mise à la terre.

Dans la réalisation du réseau de terre des postes HT, quelques valeurs standards sont recommandées par les normes (NFC 13-100 et NFC 11-200, CEI61140, IEEE80-2000) :

- Dimensions de la grille de mise à la terre, série GTC-25/4 sont : 2,50x0,4m (conformément à la norme)
- Caractéristiques du sol [8] : $h \leq 1mm$; $\varepsilon_r = 5$; $\mu_r = 1$ et $\rho = 10 \Omega m$

Ces paramètres permettent de définir la permittivité et la perméabilité relative (ε_r, μ_r) par rapport à leur valeur dans le vide:

- $\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$ est la permittivité relative

Et $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$ est la perméabilité magnétique relative

ε_r et μ_r sont les permittivité et perméabilité correspondantes du sol.

Dans la majorité de cas, on considère $\mu = \mu_0$; pour $\mu_r = 1$.

✓ Pour la résistance de la prise de terre du poste, on a :

$$R = \frac{\rho}{4r} \text{ et } r = \sqrt{\frac{ab}{\pi}} = \sqrt{\frac{2,50 \times 0,4}{3,14}} = 0,56 \text{ et } R = \frac{10}{4 \times 0,56} = \frac{10}{2,24} = 4,4 \Omega$$

Cette valeur est acceptable conformément à la norme et donne lieu à grande performance de la prise de terre ($R < 10 \Omega$); a et b sont respectivement la longueur et la largeur de la grille

La conductance G devient : $G = \frac{1}{R} = \frac{1}{3,5} = 0,28 \Omega^{-1}$

✓ Pour la capacité du circuit de terre

Considérant que la grille de mise à la terre et les différentes couches que constitue le sol forment un condensateur plan, la capacité de ce dernier devient :

$$C = \varepsilon \frac{S}{a} \text{ et } \varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r = 5 \times 8,85 \times 10^{-12} = 44,25 \times 10^{-12}$$

$S = \text{surface des armatures} = 2,50 \times 0,4 = 1 \text{ m}^2$

S'agissant de la profondeur entre la grille de mise à la terre et la première couche du sol qui correspond aux remblais sableux pollués, aux déchets industriels hétérogènes et aux dépôts argileux alluviaux, situés entre la surface est de 2 à 4 m.

$$C = \epsilon \frac{S}{a} = 44,25 \times 10^{-12} \times \frac{1}{4} = 11 \times 10^{-12} \text{ F} = 11 \text{ pF}$$

Les valeurs numériques de G et C de la fonction de transfert du réseau de terre étant déterminées, nous pouvons écrire :

$$F_4(s) = \frac{s}{0,28 + 0,01s} \tag{30}$$

Considérant que :

- $V_{pe} \leq 50 \text{ V}$ tension de pas d'entrée (consigne ou tension de référence)
- $i_p(t) = I_0 [\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)]$: courant de foudre : la perturbation au système

Par expérimentation, l'ordre de grandeur des paramètres du courant de décharge selon la publication de Frédéric ELIE « Foudre et tension de pas novembre 2005 » est de :

$\alpha = 0,02 \mu\text{s}$, $\beta = 1 \mu\text{s}$, pour une amplitude du courant de $I_0 = 30 \text{ kA}$.

Le temps de montée pour atteindre le pic de l'onde est obtenu par :

$t_{\text{montée}} = 1/(-\alpha) \cdot \ln(\beta / \alpha)$, dont l'ordre de grandeur est de :

$t_m = 2,2 \mu\text{s}$.

- Câble de garde : $F_1(s) = \frac{1}{0,07 + s}$
- Transformateur : $F_2(s) = \frac{-V}{5 + 0,04s^2} = \frac{310^8}{5 + 0,04s}$
- Parafoudre : $F_3(s) = \frac{0,25}{s}$
- Grille de mise à la terre : $F_4(s) = \frac{s}{0,28 + 0,01s}$

La sortie du système $V_{ps}(s)$: tension de pas désirée lors de l'écoulement du courant de foudre au sol.

Après obtention de toutes les fonctions de transfert des composants du circuit d'écoulement de l'onde de choc du poste HT en couplage avec le transformateur de puissance, le schéma bloc fonctionnel du système devient :

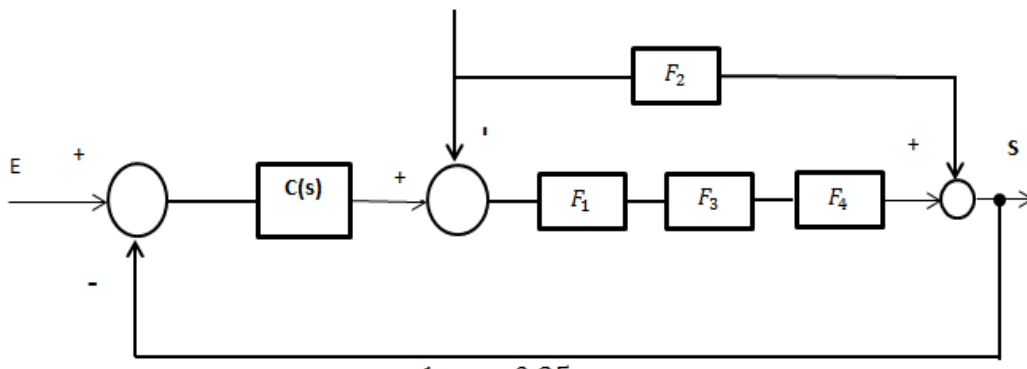


Fig. 10. Bloc fonctionnel du circuit d'écoulement de l'onde de choc

La fonction de transfert F(s) des composants du circuit direct d'écoulement devient :

$$F(s) = F_1 F_2 F_3 = \frac{1}{s + 0,07} \times \frac{0,25}{s} \times \frac{s}{0,01s + 0,28}$$

$$F(s) = \frac{0,25s}{0,01s^3 + 0,2807s^2 + 0,0196s}$$

$$F(s) = \frac{0,25}{0,01s^2 + 0,2807s + 0,0196} \quad (31)$$

F(s) représente l'impédance transitoire qui doit agir sur la vitesse d'écoulement du courant de foudre au sol ; ce courant est considéré comme une perturbation au système.

Ci-dessous l'allure de la réponse indicielle de F(s) sous l'action de la perturbation.

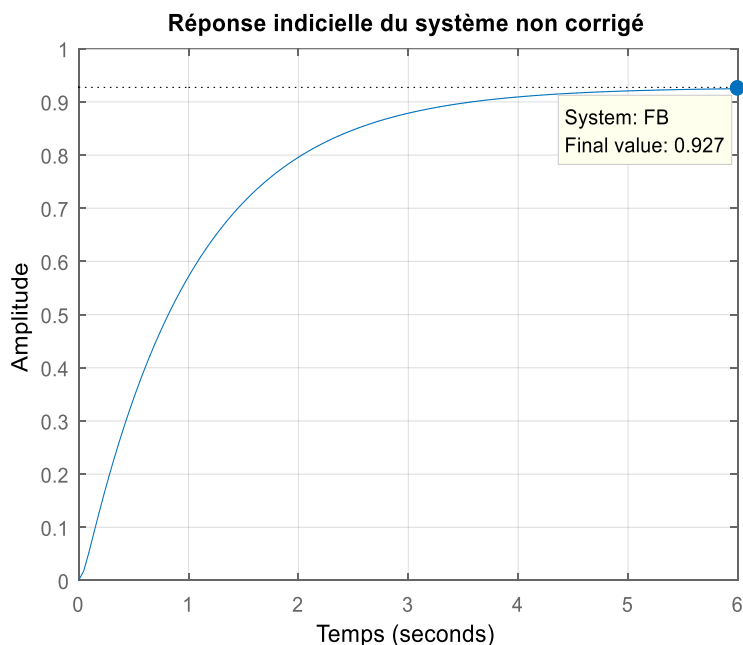


Fig. 11. Réponse du système à une entrée échelon

F(s) présente une erreur de l'ordre de 7% ; il y'a donc intérêt à corriger pour que la sortie soit l'image de l'entrée.

L'insertion du correcteur dans le circuit d'écoulement avec boucle fermée donne lieu au schéma bloc ci-dessous :

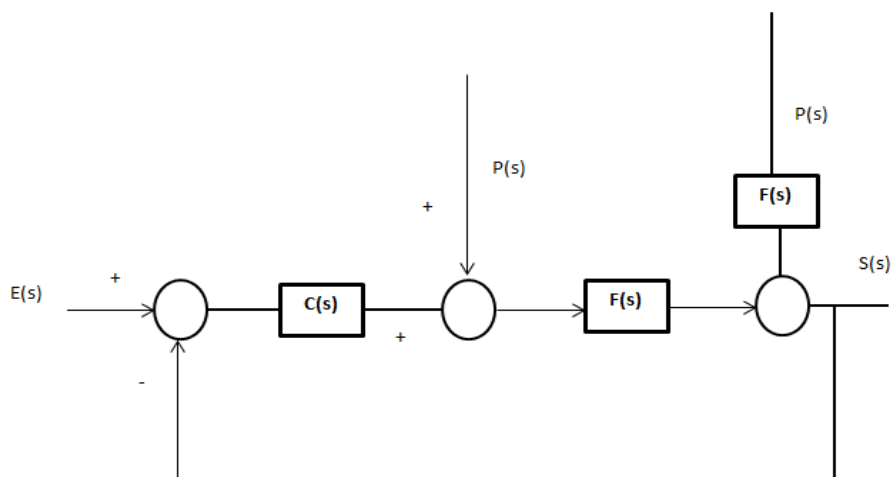


Fig. 12. Schéma bloc du circuit d'écoulement avec insertion du correcteur

La sortie du système boucle fermée tenant compte de la perturbation et de la surtension induite dans le transformateur permet d'écrire :

$$S(B) = \frac{C(s)F(s)}{1 + C(s)F(s)} + \frac{F(s)}{1 + F(s)C(s)} + \frac{F2(s)P(s)}{1 + C(s)F(s)}$$

Face à l'imprécision que présente F(s), il est indispensable de synthétiser dont l'action est de rejeter la perturbation P(s).

SYNTHÈSE DU CORRECTEUR C(s)

A boucle fermée F(s), bien que du second ordre, représente deux transmittances du premier ordre en cascade avec un pôle dominant de la forme :

$$F(s) = \frac{0,25}{0,01s^2 + 0,2807s + 0,0196} = \frac{0,25}{(s + 0.996)(s + 27,1)} \cong \frac{0,25}{(s + 1)(s + 27,1)}$$

L'expérience et la théorie soutiennent que le temps de réponse du système du premier ordre vaut $t_r = 3\tau$ or $\tau = 1$ s

$$\frac{Tr_{5\%}}{T_m} = \frac{3\tau}{2,2} = \frac{3}{2,2} = 1,36 \text{ et } t_r = 1,36 \times 2,2 \cong 3\mu s$$

La fonction de transfert du régulateur PID ayant la forme :

$$C(s) = P + \frac{I}{s} + D \frac{N}{1+\frac{N}{s}} \tag{32}$$

Grace à l'outil numérique Matlab, simulink, la boite à outil « PID tuner » ci-dessous, nous pouvons déterminer les paramètres du correcteur

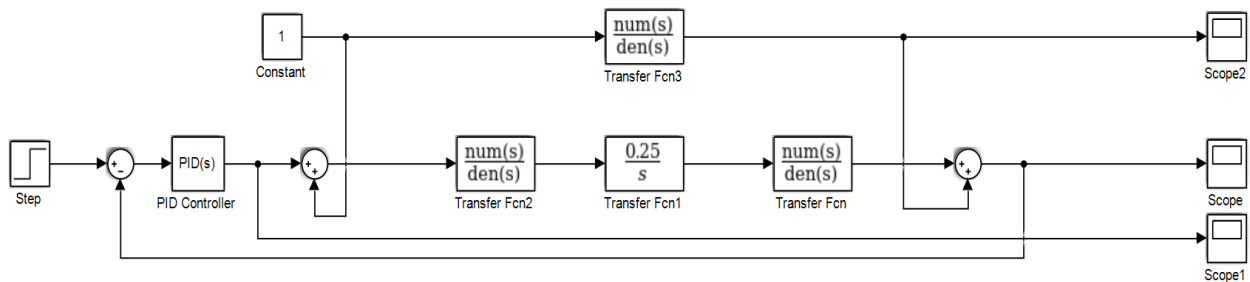


Fig. 13. Modélisation du circuit d'écoulement de l'onde de choc sous environnement matlab simulink

Les résultats de simulation sont consignés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1. Résultats de simulation

Controller Parameters	
	Tuned
P	4.3347
I	3.3103
D	-0.30048
N	14.4257
Performance and Robustness	
	Tuned
Rise time	0.283 seconds
Settling time	3 seconds
Overshoot	16.3 %
Peak	1.16
Gain margin	19.7 dB @ 19.4 rad/s
Phase margin	57.2 deg @ 3.96 rad/s
Closed-loop stability	Stable

Les paramètres du correcteur sont :

$$P = 4,3347, I = 3,303, D = -0,30048, N = 14,4257$$

N est un pôle d'adoucissement c.a.d un pôle de compensation du correcteur.

$$C(s) = \frac{U(s)}{\varepsilon(s)} = 4.3347 + \frac{3,3103}{s} - \frac{-0,030048 \times 14,4257}{1 + \frac{14,4257}{s}}$$

$$C(s) = \frac{U(s)}{\varepsilon(s)} = 4.3347 + \frac{3,3103}{s} - \frac{-4,3346s}{s+14,4257} = \frac{-62,2s}{s^2+14,43s}$$

$$C(s) = \frac{U(s)}{\varepsilon(s)} = \frac{-62,2}{s+14,43} \tag{33}$$

L'expression (34) représente le modèle du correcteur recherché.

Les effets de la correction après simulation sont donnés par les courbes ci-dessous :

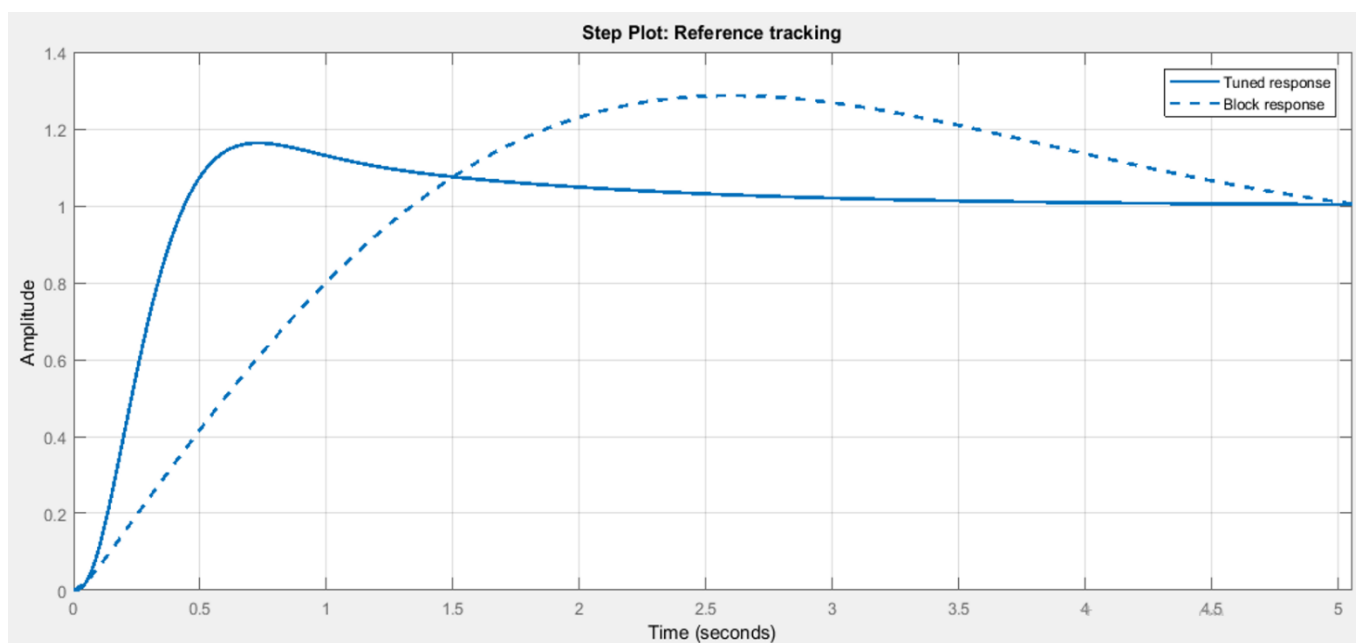


Fig. 14. Réponse du système avant correction en courbe pointillée et après correction en continu

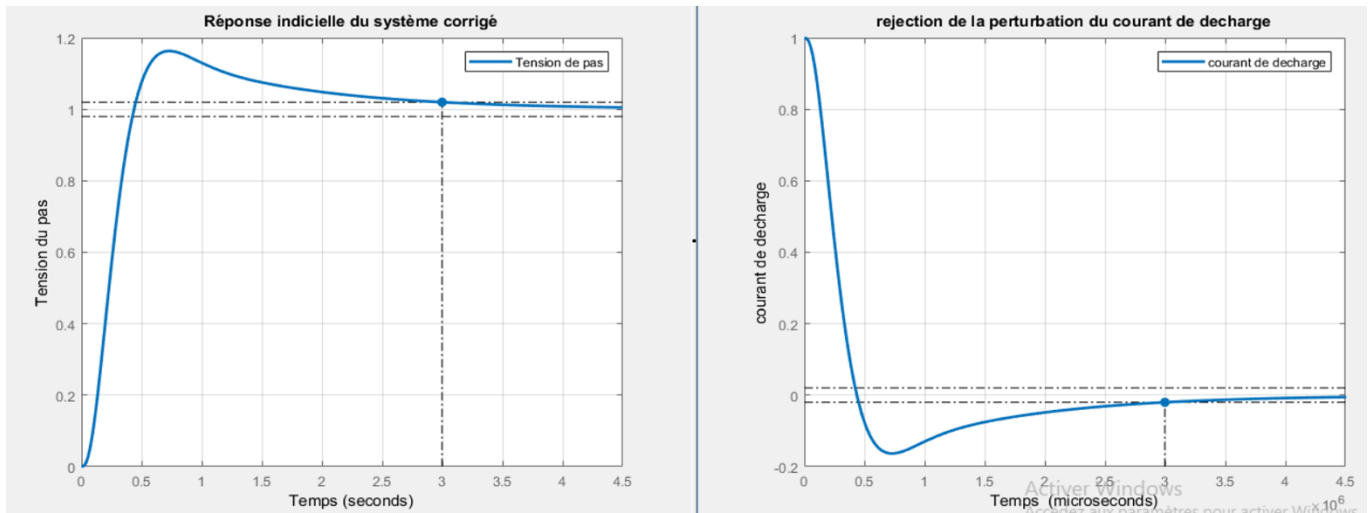


Fig. 15. (a) Réponse du circuit d'écoulement à l'action du courant de foudre (b) Réjection du courant de foudre par le circuit sous l'action du correcteur

La rejection de la perturbation dans le plan de Bode sont représentées par la figure ci-dessous.

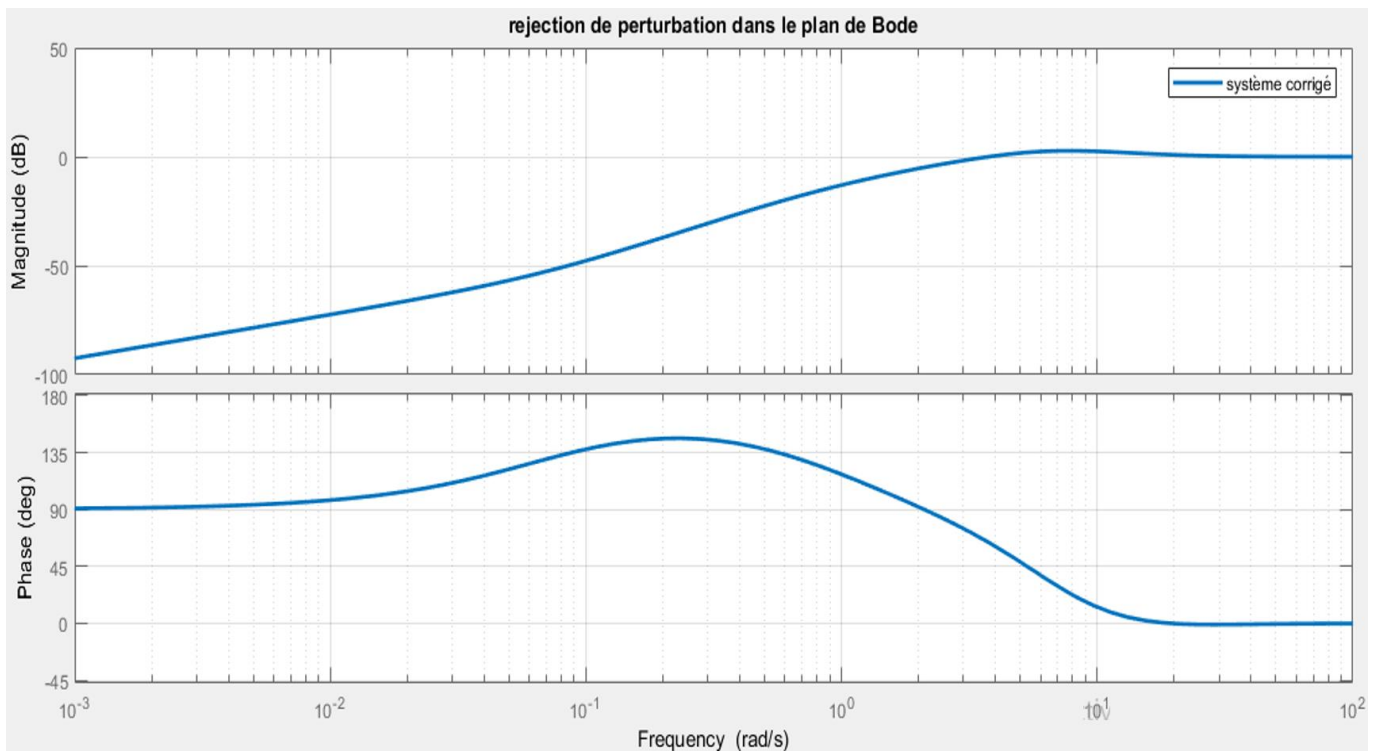


Fig. 16. Réponse du circuit d'écoulement sur le plan de bode.

Pour le passage de $C(s)$ à la forme numérique, nous utilisons la transformation bilinéaire de la forme :

$$s = \frac{2}{T_e} \frac{Z-1}{Z+1} \tag{34}$$

$F(s)$ est identifié comme deux systèmes du 1^{er} ordre en cascade, avec un pôle dominant, donc $\tau = 1$

La période d'échantillonnage est obtenue à partir de la condition ci-dessous :

$\tau \gg T_e \geq \frac{\tau}{4}$; $1 \geq T_e \geq 0,25$; $T_e = 0,5$ Séc Le correcteur sous la forme échantillonné devient :

$$C(z) = \frac{-62,2}{\frac{2}{T_e} \left(\frac{Z-1}{Z+1} \right) + 14,43} = \frac{-62,6}{\frac{2}{0,5} \left(\frac{Z-1}{Z+1} \right) + 14,43}$$

$$C(z) = \frac{-62,2}{18,43Z + 10,43}$$

$$C(z) = \frac{-3,37}{z+0,566} \tag{35}$$

La loi de commande du correcteur s'obtient selon la démarche suivante :

$$C(z^{-1}) = \frac{U(z^{-1})}{\varepsilon(z^{-1})} = \frac{-3,37z^{-1}}{1 + 0,566z^{-1}} \rightarrow U(z^{-1})(1 + 0,566z^{-1}) = \varepsilon(z^{-1})(-3,37z^{-1})$$

$$Z^{-1}[U(z^{-1}) + 0,566z^{-1}U(z^{-1})] = Z^{-1}[\varepsilon(z^{-1})(-3,37z^{-1})]$$

L'expression finale de la loi de commande devient :

$$u(k) = -0,566 u(k-1) - 3,37 \varepsilon(k-1) \tag{36}$$

L'expression ci-dessus représente la loi de commande qui permettra l'implémentation dans un calculateur numérique pour piloter le système physique.

3 CONCLUSION

La ville de Kinshasa, géographiquement se retrouve en Afrique centrale, une région du monde qui est régulièrement arrosée par la foudre. A ce titre les équipements de protection contre la surtension atmosphérique des postes HT, souvent implantés à l'air libre, doivent être bien dimensionné et fiable.

Au-delà des équipements de protection existant, cette publication à proposer l'insertion dans la partie commande de ces équipements, d'un correcteur PID dont l'action est de rejeter les effets de la perturbation afin d'éviter le stress et l'usure des diélectrique susceptible de réduire la durée de vie des équipements du poste HT.

Après simulation du circuit d'écoulement de l'onde de choc sous l'environnement matlab simulink et sous l'action du correcteur, le temps de réponse du circuit est ramené à 3 secondes, valeur comprise dans l'intervalle de temps de réponse recommandée par la Commission Electrotechnique internationale dans sa norme CEI 62305-01

REFERENCES

- [1] Frédéric Elie, Foudre et tension de pas, Novembre 2005.
- [2] Frédéric. Elie, sécurité électrique » septembre 2004.
- [3] Khanh-Nam HO, L'analyse des paramètres de la foudre et modélisation du champ électromagnétique, Laboratoire GEPASUR, <http://gepasud.upf.pf>.
- [4] AFFOLTER Jean-François, HAUTE TENSION, Ecole d'Ingénieurs du canton de Vaud, Département E+, Yverdon-les-Bains, octobre 2000.
- [5] Jean-Louis LILIEN, Transport et Distribution de l'Énergie Electrique, Manuel de travaux pratiques destiné au cours, Université de Liège 1999/2000.
- [6] M. MECHATI, Modélisation du parafoudre à varistance ZnO pour l'étude de l'amélioration de ses propriétés électriques, mémoire magister, Université de BADJI MOKHTAR ANNABA, 2010.
- [7] Tahar ROUIBAH, Contribution à la modélisation et à la simulation des prises de terre des installations électriques, thèse de doctorat, Université FERHAT ABBES - SETIF 1 UFAS (Algérie), 2015.
- [8] Caractéristiques électriques du sol, UIT Genève, 2018.