



Collection technique

Cahier technique n° 190

La ferrorésonance

Ph. Ferracci



Les Cahiers Techniques constituent une collection d'une centaine de titres édités à l'intention des ingénieurs et techniciens qui recherchent une information plus approfondie, complémentaire à celle des guides, catalogues et notices techniques.

Les Cahiers Techniques apportent des connaissances sur les nouvelles techniques et technologies électrotechniques et électroniques. Ils permettent également de mieux comprendre les phénomènes rencontrés dans les installations, les systèmes et les équipements.

Chaque Cahier Technique traite en profondeur un thème précis dans les domaines des réseaux électriques, protections, contrôle-commande et des automatismes industriels.

Les derniers ouvrages parus peuvent être téléchargés sur Internet à partir du site Schneider.

code : <http://www.schneiderelectric.com>

rubrique : **maîtrise de l'électricité**

Pour obtenir un Cahier Technique ou la liste des titres disponibles contactez votre agent Schneider.

La collection des Cahiers Techniques s'insère dans la « Collection Technique » du groupe Schneider.

Avertissement

L'auteur dégage toute responsabilité consécutive à l'utilisation incorrecte des informations et schémas reproduits dans le présent ouvrage, et ne saurait être tenu responsable ni d'éventuelles erreurs ou omissions, ni de conséquences liées à la mise en œuvre des informations et schémas contenus dans cet ouvrage.

La reproduction de tout ou partie d'un Cahier Technique est autorisée après accord de la Direction Scientifique et Technique, avec la mention obligatoire : « Extrait du Cahier Technique Schneider n° (à préciser) ».

n° 190

La ferrorésonance



Philippe FERRACCI

Diplômé de l'École Supérieure d'Électricité en 1991, a soutenu une thèse sur le régime du neutre compensé, en collaboration avec la Direction des Études et Recherches d'EDF. En 1996, il a rejoint le Groupe Schneider où il mène des études avancées dans les domaines de l'électrotechnique et des réseaux électriques.

Lexique

CPI : Contrôleur permanent d'isolement

Dispositif prévu pour indiquer (par un signal sonore ou visuel) l'apparition d'un premier défaut d'une partie active à la masse ou à la terre.

Nombre irrationnel (non fractionnaire)

Nombre qui ne peut s'exprimer comme quotient de deux entiers ($\sqrt{2}$, $\sqrt{3}$, π ...).

TCT : Transformateur condensateur de tension (CEI 186)

Transformateur de tension comprenant un diviseur capacitif et un élément

électromagnétique conçus et connectés de façon que la tension secondaire de l'élément électromagnétique soit pratiquement proportionnelle à la tension primaire appliquée au diviseur capacitif et en phase avec elle.

TT : Transformateur de tension (CEI 50)

Transformateur de mesure dans lequel la tension est, dans les conditions normales d'emploi, pratiquement proportionnelle à la tension primaire et déphasée par rapport à celle-ci d'un angle voisin de zéro, pour un sens approprié des connexions.

La ferrorésonance

La ferrorésonance est un phénomène de résonance non linéaire qui peut affecter les réseaux électriques. Les taux d'harmoniques anormaux, les surtensions ou les surintensités transitoires ou permanentes qu'elle provoque sont souvent dangereux pour le matériel électrique. Parmi les avaries mal élucidées, certaines sont dues à ce phénomène rare et non-linéaire.

Ce Cahier Technique permet de comprendre la ferrorésonance. Les méthodes présentées permettent de prédire et d'expertiser de façon crédible les risques de ferrorésonance dans une installation existante ou en développement. Des solutions pratiques permettant d'éviter ou de supprimer la ferrorésonance sont données.

Sommaire

1 Introduction		p. 4
2 Comprendre la ferrorésonance	2.1 Résonance	p. 5
	2.2 Ferrorésonance	p. 5
3 Identifier la ferrorésonance	3.1 Éléments de diagnostic	p. 10
	3.2 Exemples de situations de réseaux électriques propices à la ferrorésonance	p. 10
4 Éviter ou amortir la ferrorésonance	4.1 Solutions pratiques	p. 16
	4.2 Critères d'évaluation pratiques	p. 19
5 Études pour prévoir ou comprendre	5.1 Exemple d'étude	p. 20
	5.2 Modélisation, approche mathématique	p. 23
	5.3 Récapitulation	p. 25
6 Conclusion		p. 26
Annexe 1 : Bibliographie		p. 27
Annexe 2 : Guide de choix des résistances de charge des TT		p. 28

1 Introduction

Apparu pour la première fois dans la littérature en 1920, le mot ferro-résonance désigne tous phénomènes oscillatoires qui apparaissent dans un circuit électrique qui comprend au moins :

- une inductance non linéaire (ferromagnétique saturable),
- un condensateur,
- une source de tension (généralement sinusoïdale),
- de faibles pertes.

Les réseaux électriques comportent de nombreuses inductances saturables (transformateurs de puissance, transformateurs inductifs de mesure de tension (TT), réactances shunts), ainsi que des condensateurs (câbles, lignes longues, transformateurs capacitifs de tension, condensateurs de compensation série ou shunt, condensateurs de répartition de tension entre les chambres de coupure de disjoncteurs, postes blindés). Ils sont donc susceptibles de présenter des configurations propices à l'existence de la ferro-résonance.

La principale caractéristique de ce phénomène est de présenter au moins deux régimes permanents stables. Il apparaît à la suite d'un transitoire, lors de surtensions atmosphériques, enclenchement ou déclenchement de transformateurs ou de charges, apparition ou élimination de défaut, travaux sous tension... Il y a possibilité de transition brutale d'un état stable normal (sinusoïdal à la même fréquence que la source) à un autre état stable ferro-résonant caractérisé par de fortes surtensions et par des taux d'harmoniques importants dangereux pour le matériel.

Un exemple pratique de ce comportement (surprenant pour la personne non avertie) est celui de la mise hors tension d'un transformateur de tension par ouverture d'un disjoncteur. Le transformateur restant alimenté par la capacité des chambres de coupure du disjoncteur, la manœuvre peut conduire soit à une tension nulle

aux bornes du transformateur soit à une tension permanente très distordue et d'amplitude très supérieure à la tension normale.

Pour éviter les conséquences de la ferro-résonance (déclenchement intempestif de protection, destruction de matériels tels que transformateurs de puissance ou de mesure de tension, pertes de production ...) il faut :

- comprendre le phénomène,
- le prédire,
- savoir l'identifier et
- l'éviter ou le supprimer.

Ce phénomène complexe est mal connu parce qu'il est rare et qu'il ne peut pas être analysé ou prédit par les méthodes de calculs (basées sur l'approximation linéaire) habituellement utilisées par les électriciens. Étant mal connu, des destructions de matériels ou des dysfonctionnements mal élucidés lui sont volontiers attribués.

Une distinction entre résonance et ferro-résonance permet de mettre en évidence les caractéristiques particulières et parfois déroutantes du phénomène de ferro-résonance.

Des exemples pratiques de configurations de réseaux d'énergie électrique à risque d'existence de ferro-résonance permettent d'identifier et de mettre en évidence la variété des configurations potentiellement dangereuses.

Le concepteur de réseaux avisé évite de se placer dans les situations à risques.

Si des doutes subsistent concernant des configurations limites et inévitables, une étude prédictive doit être entreprise par des spécialistes. Des outils d'analyse numérique adaptés permettent de prévoir et d'expertiser les possibilités de ferro-résonance dans un réseau pour l'ensemble des valeurs possibles des paramètres de ce réseau en condition d'exploitation normale ou dégradée. Des solutions pratiques existent pour éviter la ferro-résonance ou pour s'en protéger.

2 Comprendre la ferrorésonance

2.1 Résonance

Le phénomène de résonance se rencontre sur les réseaux électriques quel que soit leur niveau de tension.

Il peut être rencontré par exemple dans le cas d'un régime de neutre compensé (bobine de Petersen) utilisé pour minimiser les courants de défaut en MT. Il peut aussi être à l'origine de destructions diélectriques ou thermiques ou de vieillissements prématurés de matériels électriques par surtension et par surintensité (résonance harmonique ...).

Dans le cas de la résonance série et en régime sinusoïdal ($U = E \cos(\omega_n t)$), la relation entre les tensions peut s'exprimer sous forme vectorielle : $\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_L + \vec{U}_C$ (cf. **fig. 1**).

Dans le cas particulier de la résonance, les tensions aux bornes du condensateur et de l'inductance se compensent et le circuit est dit en situation de résonance. La pulsation ω_n pour laquelle cette résonance apparaît est telle que $L C \omega_n^2 = 1$.

L'amplitude du courant I est alors égale à :

$$I = \frac{E}{R}$$

Ce courant peut être très important.

L'amplitude de la tension aux bornes du condensateur (et aux bornes de l'inductance) est égale à $k.E$.

Le facteur de qualité k a pour expression :

$$k = \frac{L \omega_n}{R} = \frac{1}{R C \omega_n}$$

2.2 Ferrorésonance

Les différences fondamentales d'un circuit ferrorésonant par rapport à un circuit résonant linéaire (§ 2.1) sont, pour ω donnée :

- la possibilité qu'il a de résonner dans une large plage de valeurs de C ,
- la fréquence des ondes de tensions et de courants qui peut être différente de celle de la source de tension sinusoïdale,
- l'existence de plusieurs régimes permanents stables pour une configuration et des valeurs de

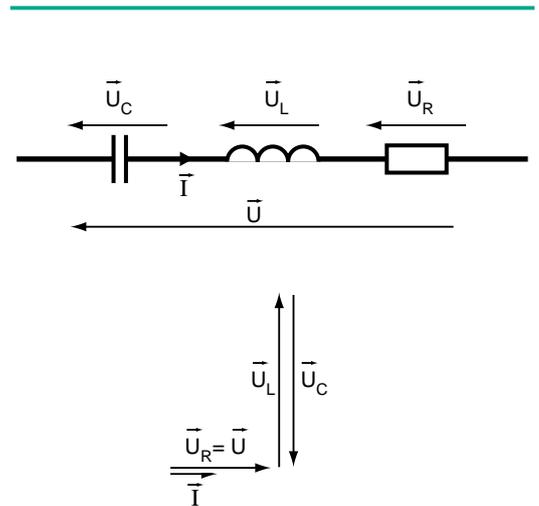


fig.1 : résonance série.

Selon la valeur de k l'amplitude de la tension $U_L (= U_C)$ peut être inférieure ou supérieure à l'amplitude E de la tension d'excitation U .

Il y a résonance harmonique lorsque la pulsation ω_n coïncide avec une pulsation harmonique $n \omega_0$ (ω_0 pulsation du réseau) générée par certains équipements (moteurs à vitesse variable, redresseurs statiques ...). La résonance harmonique peut également avoir des conséquences néfastes sur le matériel électrique et doit donc être maîtrisée [6], [7].

paramètres donnés. Un de ces régimes est le régime « normal » attendu (dans l'hypothèse linéaire), les autres régimes « anormaux » inattendus sont souvent dangereux pour le matériel.

Le régime effectivement atteint dépend des conditions initiales (charges électriques des condensateurs, flux rémanent du matériau constituant le circuit magnétique des transformateurs, instant d'enclenchement).

Approche physique

L'étude des oscillations libres du circuit de la **figure 2a** permet d'illustrer ce comportement particulier. Les pertes sont supposées négligeables et la caractéristique $\phi(i)$ simplifiée de la bobine à noyau de fer est celle représentée **figure 2b**. Malgré ces hypothèses simplificatrices, les formes d'ondes correspondantes (cf. **fig. 2c**) sont caractéristiques d'un régime de ferrorésonance périodique.

A l'origine, la tension aux bornes de la capacité est supposée égale à V_0 .

■ A l'instant t_0 l'interrupteur K est fermé. Un courant i s'établit et oscille à la pulsation

$$\omega_1 = 1/\sqrt{LC}$$

Les expressions du flux dans la bobine et de la tension V aux bornes du condensateur sont alors :

$$\phi = (V_0/\omega_1)\sin\omega_1 t; \quad v = V_0 \cos\omega_1 t.$$

■ Si $V_0/\omega_1 > \phi_{\text{sat}}$, au bout du temps t_1 , le flux ϕ atteint le flux de saturation ϕ_{sat} , la tension v est égale à V_1 et l'inductance de la bobine saturée devient L_s . Comme L_s est très petite devant L , le condensateur se « décharge » brusquement à travers la bobine, sous forme d'une oscillation de pulsation $\omega_2 = 1/\sqrt{L_s C}$. Le courant et le flux passent par un maximum lorsque l'énergie électromagnétique emmagasinée par la bobine est égale à l'énergie électrostatique $1/2 CV_1^2$ restituée par le condensateur.

■ A l'instant t_2 , le flux revient à ϕ_{sat} , l'inductance prend de nouveau la valeur L et comme les pertes ont été négligées, la tension v qui s'est inversée est égale à $-V_1$.

■ A l'instant t_3 , le flux atteint $-\phi_{\text{sat}}$ et la tension v est égale à $-V_2$.

Comme ω_1 est en pratique très petite on peut considérer $V_2 \approx V_1 \approx V_0$.

Par conséquent la période T de l'oscillation est comprise entre $2\pi\sqrt{LC}$ dans le cas non saturé et $2\pi\sqrt{L_s C} + 2(t_3 - t_2)$ dans le cas saturé (avec $t_3 - t_2 \approx 2\phi_{\text{sat}}/V_0$).

La fréquence f correspondante ($f = 1/T$) est donc telle que :

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} < f < \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C}}$$

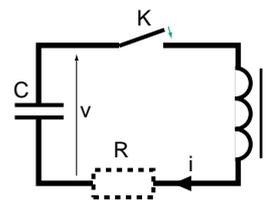
Cette fréquence initiale dépend de ϕ_{sat} c'est à dire de la non linéarité et de la condition initiale V_0 .

En pratique, du fait des pertes $R i^2$ dans la résistance R (principalement à chaque inversion de tension), l'amplitude de la tension V décroît ($V_2 < V_1 < V_0$). Comme la variation de flux $\Delta\phi$ pendant la période ($t_3 - t_2$) non saturée est telle

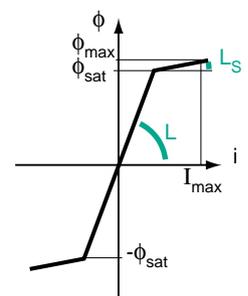
$$\text{que } \Delta\phi = 2\phi_{\text{sat}} = \int_{t_2}^{t_3} v dt,$$

la diminution de v conduit à une diminution de la fréquence. Si les pertes d'énergie (pertes joules, pertes fer ...) sont compensées par l'énergie apportée par une source de tension, la fréquence en diminuant

a - Schéma de principe



b - Caractéristique $\phi(i)$ simplifiée



c - Tension v , courant i et flux ϕ en fonction du temps

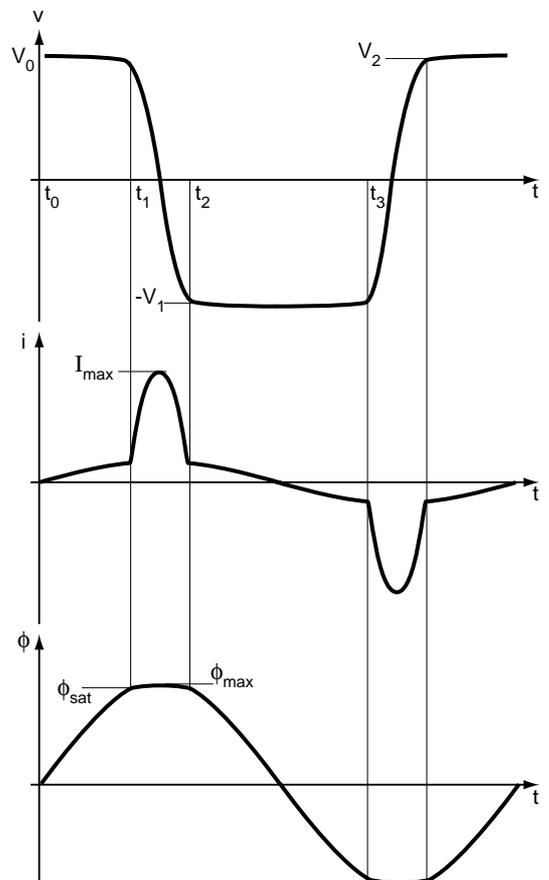


fig. 2 : oscillations libres d'un circuit ferrorésonant série.

peut se synchroniser sur la fréquence de la source (dans le cas où la fréquence initiale est supérieure à la fréquence du réseau) ou même à une fréquence sous-multiple de celle de la source (dans le cas où la fréquence initiale est plus petite que la fréquence du réseau).

Ceci montre que contrairement à la résonance linéaire (§ 2.1), pour une inductance donnée, le phénomène de résonance peut apparaître non plus pour une valeur particulière de C mais pour une large gamme de valeurs de C .

■ Les différences fondamentales entre un circuit ferrorésonant et un circuit résonant linéaire sont :

- possibilité de résonance dans une large gamme de valeurs des paramètres,
- la fréquence des ondes de tensions et de courants peut être différente de celle de la source sinusoïdale,
- l'existence de plusieurs régimes permanents stables pour une configuration et des valeurs de paramètres données

■ La ferrorésonance peut être monophasée (cas précédent). Elle est dite triphasée dans le cas d'un couplage magnétique non linéaire entre les phases ; elle est dite trimonophasée en l'absence de couplage entre les trois non-linéarités.

La ferrorésonance est de type série ou parallèle.

Caractéristiques principales

Grâce aux méthodes adaptées précisées dans la suite du document, l'étude du circuit de la **figure 3a** permet de tracer les courbes représentées **figures 3b et 3c**. Ces courbes illustrent les caractéristiques de la ferrorésonance :

■ Sensibilité vis à vis des valeurs des paramètres du réseau, phénomène de saut

La courbe de la **figure 3b** décrit la tension crête V_L aux bornes de l'inductance non linéaire en fonction de l'amplitude crête E de la source de tension sinusoïdale.

En augmentant progressivement l'amplitude crête E à partir de zéro, la courbe de la **figure 3b** illustre la possibilité de trois comportements différents selon la valeur de E ainsi que le phénomène de saut :

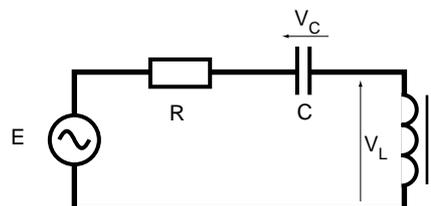
- Pour $E = E_1$ la solution (M_{1n}) est unique et correspond au régime normal (obtenue dans l'hypothèse linéaire),
- Pour $E = E_2$, il existe trois solutions (M_{2n} , M_{2i} , M_{2f}) dont deux sont stables (M_{2n} et M_{2f}). M_{2n} correspond au régime normal. M_{2f} correspond au régime ferrorésonant, la partie de la courbe en pointillés (qui ne peut être obtenue en pratique) correspond à des régimes instables,
- Pour $E = E'_2$, la tension V_L passe brutalement du point M_2 au point M'_2 (phénomène de saut). Le point M_2 s'appelle point limite,
- Pour $E = E_3$, seul le régime ferrorésonant (M_{3f}) est possible.

□ Lorsque la valeur de E décroît à partir de E_3 , la solution passe brutalement du point M_1 (deuxième point limite) au point M'_1 .

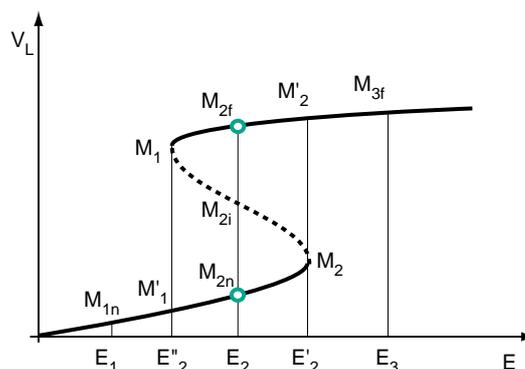
Le phénomène de saut caractéristique de la ferrorésonance peut aussi être obtenu en considérant un autre paramètre du réseau (la résistance R ou la capacité C par exemple).

Une faible variation de la valeur d'un paramètre du réseau ou un régime transitoire peut provoquer un saut brutal entre deux régimes stables très différents.

a - Circuit de base de ferrorésonance série



b - Sensibilité aux paramètres du réseau et phénomène de saut



c - Sensibilité aux conditions initiales

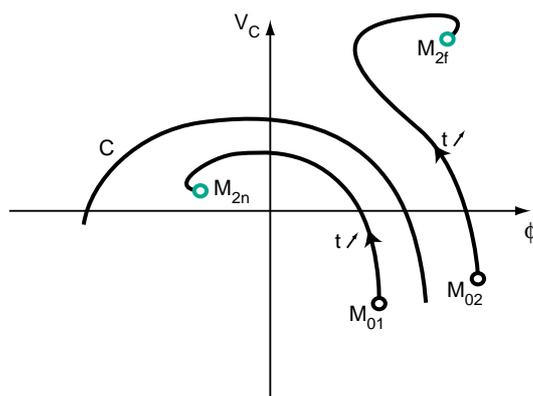
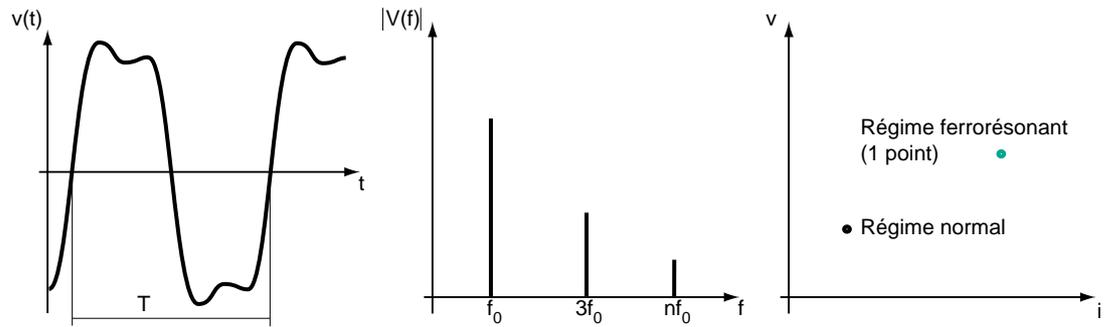


fig. 3 : illustration des caractéristiques de la ferrorésonance.

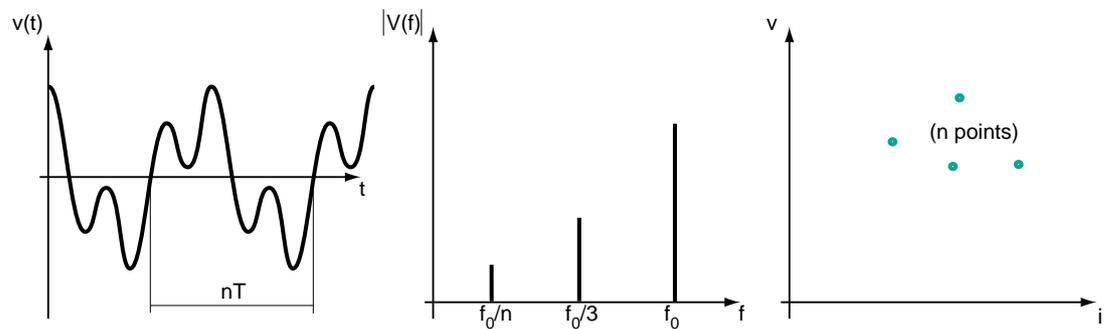
■ Sensibilité vis à vis des conditions initiales

L'obtention de M_{2n} ou de M_{2f} dépend des conditions initiales. La **figure 3c** illustre les trajectoires du régime transitoire des couples (ϕ, V_C) en fonction du temps pour des conditions initiales (M_{01} et M_{02}) différentes. La courbe C décrit une frontière. Si les conditions initiales (flux rémanent, tension aux bornes du condensateur) se trouvent d'un côté de la frontière, la solution converge vers M_{2n} . Si les conditions initiales se trouvent de l'autre côté, la

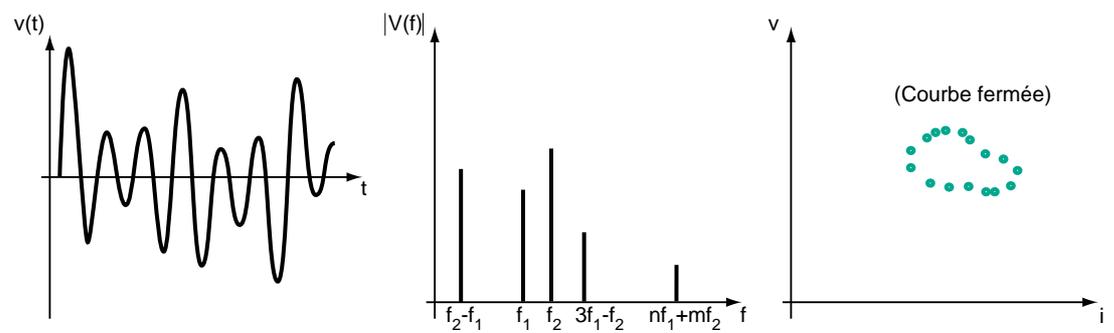
a - Régime fondamental



b - Régime sous-harmonique



c - Régime quasi-périodique



d - Régime chaotique

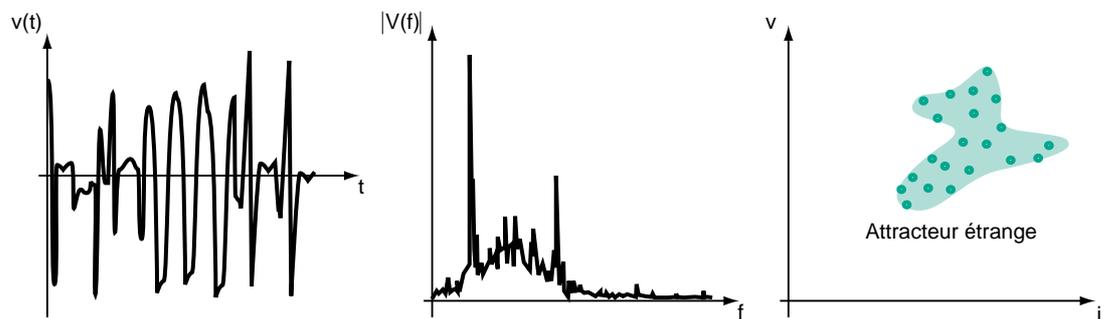


fig. 4 : illustration des caractéristiques de la ferrorésonance.

solution converge vers M_{2f} . Comme le point M_{2f} appartient à la frontière, au voisinage de ce point le régime permanent effectivement atteint est très sensible aux conditions initiales.

Classification des régimes ferrorésonants

L'expérience des formes d'onde apparaissant sur les réseaux, des expérimentations sur modèles réduits de réseaux ainsi que des simulations numériques permettent de classer les régimes de ferrorésonance en quatre types distincts.

Cette classification correspond au régime permanent, c'est à dire après extinction du régime transitoire. Il est en effet difficile pour un circuit ferrorésonant de distinguer le régime transitoire normal des régimes transitoires ferrorésonants. Ceci ne signifie en aucun cas que les phénomènes de ferrorésonance transitoire ne peuvent pas être dangereux pour le matériel électrique. Des surtensions transitoires dangereuses peuvent par exemple apparaître plusieurs périodes du réseau après un événement (par exemple à la suite d'un enclenchement d'un transformateur à vide) et persister pendant plusieurs périodes du réseau. Les quatre types de ferrorésonance que l'on rencontre sont :

- régime fondamental,
- régime sous-harmonique,
- régime quasi-périodique,
- régime chaotique.

On peut reconnaître le type de ferrorésonance [13] :

- soit par le spectre des signaux courants et tensions,
- soit par une image stroboscopique obtenue en mesurant le courant i et la tension v en un endroit donné du réseau et en traçant dans le plan v, i les valeurs instantanées à des instants séparés par une période du réseau.

Les caractéristiques de chacun de ces types de ferrorésonance sont précisées ci-dessous.

■ Régime fondamental (cf. fig. 4a)

Tensions et courants sont périodiques de période T égale à celle du réseau et peuvent comporter plus ou moins d'harmoniques. Le spectre des signaux est un spectre de raies formé du fondamental f_0 du réseau et de ses harmoniques ($2f_0, 3f_0 \dots$). L'image

stroboscopique se réduit à un point éloigné de celui représentant le régime normal.

■ Régime sous-harmonique (cf. fig. 4b)

Les signaux sont périodiques de période nT multiple de la période de la source. Ce régime est appelé sous-harmonique n ou harmonique $1/n$. Les régimes ferrorésonants sous-harmoniques sont généralement de rang impair. Le spectre présente un fondamental égal à f_0/n (f_0 est la fréquence de la source, n est un entier) et ses harmoniques (la fréquence f_0 fait donc partie du spectre).

Un tracé stroboscopique fait apparaître n points.

■ Régime quasi-périodique (cf. fig. 4c)

Ce régime (appelé aussi pseudo-périodique) n'est pas périodique. Le spectre est un spectre de raies dont les fréquences s'expriment sous la forme : $nf_1 + mf_2$ (n et m sont des nombres entiers et f_1/f_2 un nombre réel irrationnel). L'image stroboscopique fait apparaître une courbe fermée.

■ Régime chaotique (cf. fig. 4d)

Le spectre correspondant est continu, c'est à dire qu'il ne s'annule pour aucune fréquence. L'image stroboscopique est constituée de points tous distincts qui occupent une surface dans le plan v, i appelée attracteur étrange.

En conclusion :

- Le phénomène de ferrorésonance est un phénomène complexe caractérisé par :
 - une multiplicité de régimes permanents pour un circuit donné,
 - une grande sensibilité d'apparition de ces régimes aux valeurs des paramètres du réseau,
 - une grande sensibilité d'apparition de ces régimes aux conditions initiales.
- Une faible variation de la valeur d'un paramètre du réseau ou un régime transitoire peut provoquer un saut brutal entre deux régimes stables très différents et déclencher l'un des quatre types de régimes permanents de ferrorésonance; les régimes les plus souvent rencontrés sont le régime fondamental et le régime sous-harmonique.
- Les taux d'harmoniques anormaux, les surtensions ou les surintensités transitoires ou permanentes, que provoque la ferrorésonance sont souvent dangereux pour le matériel électrique.
- La ferrorésonance permanente est entretenue par l'énergie fournie par la tension du réseau.

3 Identifier la ferrorésonance

3.1 Éléments de diagnostic

La ferrorésonance se manifeste souvent par plusieurs des symptômes suivants :

- des surtensions permanentes élevées de mode différentiel (entre phases) et/ou de mode commun (entre phase et terre),
- des surintensités permanentes élevées,
- de fortes distorsions permanentes des formes d'onde de tension et de courant,
- déplacement de la tension du point neutre,
- échauffement des transformateurs (en fonctionnement à vide),
- bruit permanent et excessivement fort dans les transformateurs et les réactances,
- destruction de matériels électriques (condensateurs, TT, TCT ...) par effets thermiques ou par claquages diélectriques. Un symptôme caractéristique de la destruction des TT par ferrorésonance est en général un enroulement primaire détruit et un enroulement secondaire intact,
- déclenchement de protections qui peut paraître intempestif.

Certains de ces symptômes ne sont pas propres au phénomène de ferrorésonance. Le déplacement permanent du point neutre d'un réseau à neutre isolé peut par exemple être la conséquence d'un défaut entre une phase et la terre.

Une comparaison des allures d'éventuels enregistrements avec les formes d'ondes typiques de ferrorésonance, précisées au paragraphe précédent (cf. [fig. 4](#)), facilite un premier diagnostic.

Devant la difficulté du diagnostic (absence d'enregistrements, plusieurs interprétations possibles des symptômes) le premier réflexe est d'analyser la configuration du réseau pendant les symptômes ainsi que les événements qui les ont précédés (enclenchement de transformateurs, phase particulière de fonctionnement de procédés industriels, perte de charge ...) et qui ont pu initialiser le phénomène.

Il faut ensuite déterminer si les trois conditions nécessaires (mais non suffisantes) à l'existence de la ferrorésonance sont réunies :

- mise en présence simultanée de condensateurs et de bobines dont l'inductance est non linéaire,
- existence dans le réseau d'au moins un point dont le potentiel n'est pas fixé (neutre isolé, fusion d'un fusible, manœuvre unipolaire ...),
- composants du réseau faiblement chargés (transformateurs de puissance ou TT à vide ...) ou sources de faible puissance de court-circuit (alternateurs).

Si une seule de ces conditions n'est pas vérifiée alors la ferrorésonance est très peu probable. Dans le cas contraire des investigations plus poussées sont nécessaires.

Une étude prédictive peut être entreprise par des spécialistes. Cette étude passe en particulier par la mise en œuvre de méthodes précisées dans la suite de ce document.

Une comparaison avec les exemples de situations typiques de réseaux propices à la ferrorésonance peut faciliter l'identification d'une configuration à risques.

3.2 Exemples de situations de réseaux électriques propices à la ferrorésonance

Étant donné la multitude de sources de capacités et d'inductances non linéaires dans un réseau réel et la grande variété de conditions d'exploitation, les configurations potentiellement à risque de ferrorésonance sont innombrables.

L'expérience a cependant permis de répertorier les principales configurations typiques d'apparition de la ferrorésonance. Quelques exemples classiques sont présentés ci après.

Transformateur de tension alimenté par la capacité d'un (ou de plusieurs) disjoncteur(s) ouvert(s)

En THT des manœuvres d'exploitation (consignation d'un disjoncteur de couplage ou de tronçonnement de jeu de barres, élimination d'un défaut sur un tronçon de barres ...) peuvent provoquer la ferrorésonance des transformateurs de tension (TT) connectés entre phases et terre.

Ces différentes configurations peuvent se ramener au circuit de la **figure 5**. L'ouverture du disjoncteur D déclenche le phénomène en provoquant la décharge de la capacité C à travers le TT qui se sature [11]. L'alimentation du TT par l'intermédiaire des condensateurs C_d (de répartition de tension entre les chambres de coupure du disjoncteur) entretient ensuite le phénomène.

La capacité C représente l'ensemble des capacités à la terre du TT et de la liaison

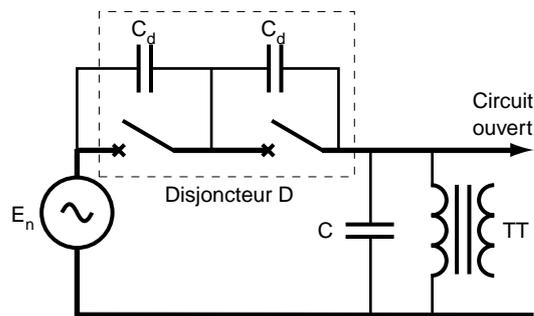


fig. 5 : ferrorésonance d'un transformateur de tension en série avec un disjoncteur ouvert.

alimentée par l'intermédiaire des capacités du ou des disjoncteurs ouverts.
La ferrorésonance est du type sous-harmonique.

Transformateurs de tension (TT) raccordés à un réseau à neutre isolé

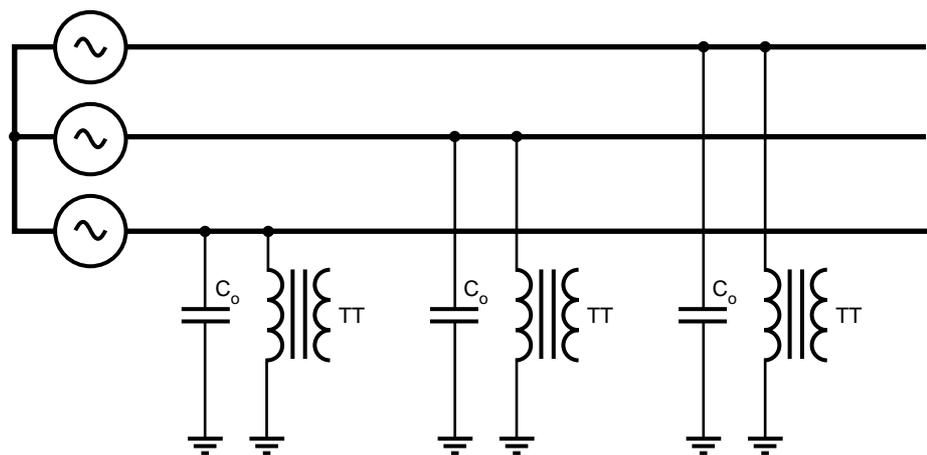
Ce régime du neutre peut être choisi, résulter du couplage d'une source de secours à neutre isolé, ou d'une défaillance du système de mise à la terre.

Des surintensités ou des surtensions passagères dues à des manœuvres en réseau (pertes de charges, élimination de défaut ...) ou à un défaut à la terre par exemple, peuvent déclencher le phénomène en saturant le circuit magnétique d'un ou de deux des TT du circuit ferrorésonant parallèle de la **figure 6**. Le régime ferrorésonant se constate sur les tensions entre phases et terre mais aussi sur la tension du point neutre (V_N).

Il y a déplacement du point neutre et une montée en potentiel par rapport à la terre d'une ou de deux phases. Ce qui peut donner l'impression d'un défaut d'isolement phase-terre au sein du réseau.

Les valeurs des surtensions peuvent dépasser en régime établi la tension composée et provoquer une destruction diélectrique du matériel électrique.

Selon les valeurs relatives de l'inductance de magnétisation du TT et de la capacité C_0 , la ferrorésonance est du type fondamental, sous-harmonique ou quasi-périodique.



C_0 : capacité homopolaire du réseau

fig. 6 : ferrorésonance de TT entre phase et terre dans un réseau à neutre isolé.

Transformateur alimenté accidentellement sur une ou deux phases

Quelques exemples de configurations à risques sont représentés **figure 7**. Ces configurations apparaissent lorsqu'un transformateur à vide ou très faiblement chargé est alimenté sur une ou deux phases suite à une fusion de fusible sur un réseau à moyenne tension, à la rupture d'un conducteur ou à des travaux sous-tension, par exemple à l'occasion de la mise en service d'une armoire de coupure télécommandée (ACT). Les capacités peuvent être celles d'une ligne ou d'un câble alimentant un transformateur dont les

enroulements primaires sont couplés en étoile neutre isolé, neutre à la terre, ou en triangle. Par exemple, le circuit ferorésonant série est constitué par la mise en série de la capacité phase-terre (entre disjoncteur et transformateur) de la phase « ouverte » et de l'impédance magnétisante du transformateur.

Les régimes sont du type fondamental, sous-harmonique ou chaotique.

Les capacités entre phases et entre terre, le couplage des enroulements primaires, secondaires, la structure du circuit magnétique (monophasé, à flux libre ou à flux forcé), le

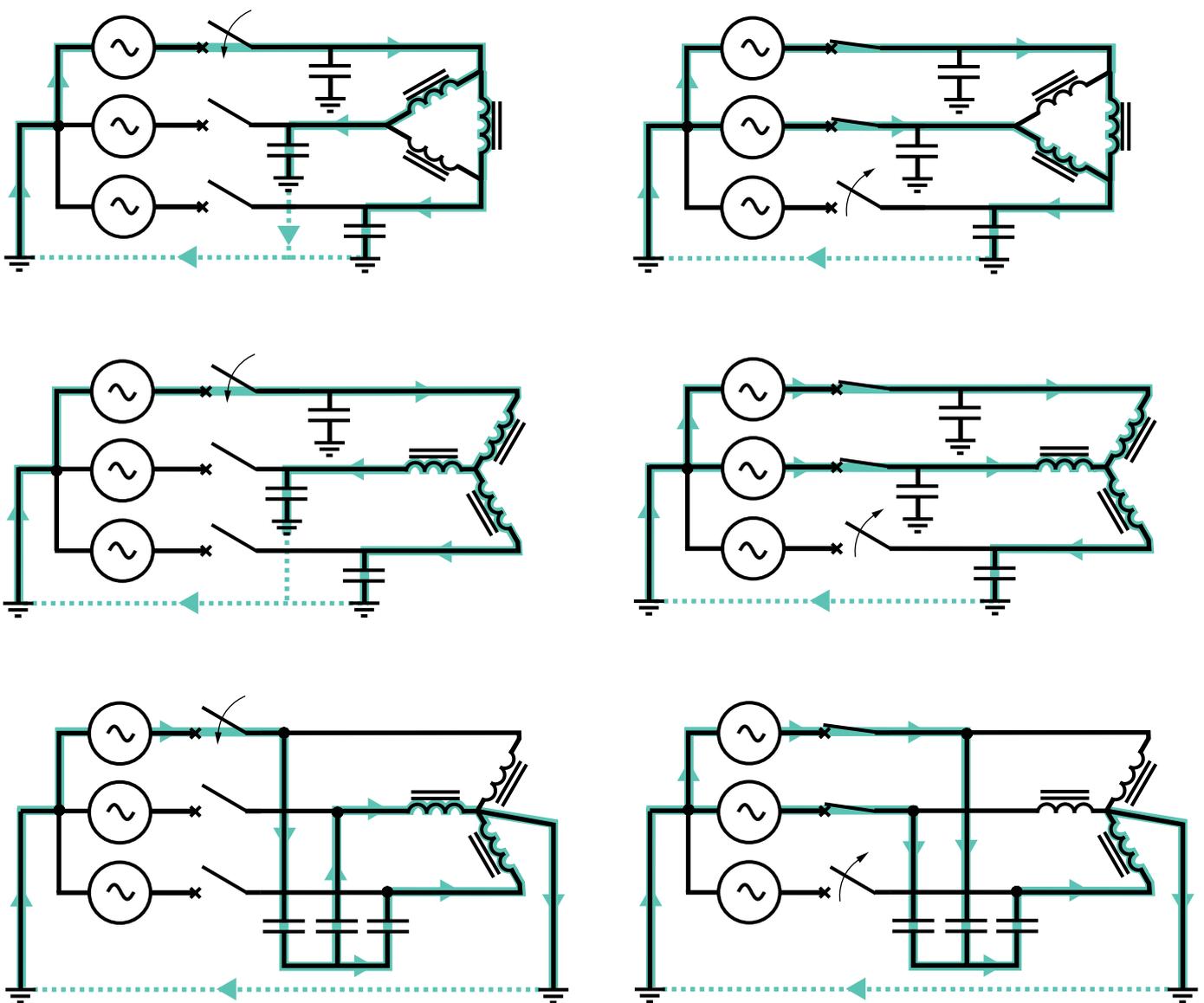


fig. 7 : exemples de systèmes déséquilibrés à risque de ferorésonance.

régime de neutre du réseau (direct à la terre, impédant, isolé) le mode d'alimentation (sur une ou deux phases) interviennent dans l'établissement d'un régime donné.

Le phénomène se produit généralement lorsque le neutre primaire est isolé.

Pour éviter les risques, il est sage d'utiliser des appareillages de coupure omnipolaires.

Transformateurs de tension et transformateurs HT/MT à neutre isolé

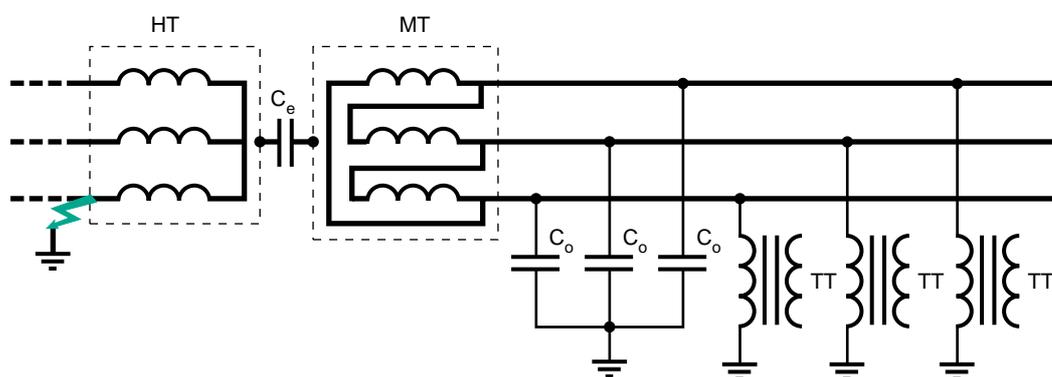
Le phénomène peut se produire lorsque les neutres HT et MT sont isolés de la terre et que

des TT sont raccordés côté MT entre phase et terre et n'alimentent pas de charge (cf. **fig. 8a**). Lors d'un défaut à la terre côté HT en amont du transformateur du poste, le neutre HT monte à un potentiel élevé. Par effet capacitif entre primaire et secondaire des surtensions apparaissent côté MT et peuvent provoquer la ferrorésonance du circuit constitué de la source de tension E_0 , des capacités C_e et C_0 et de l'inductance de magnétisation d'un TT (cf. **fig. 8b**).

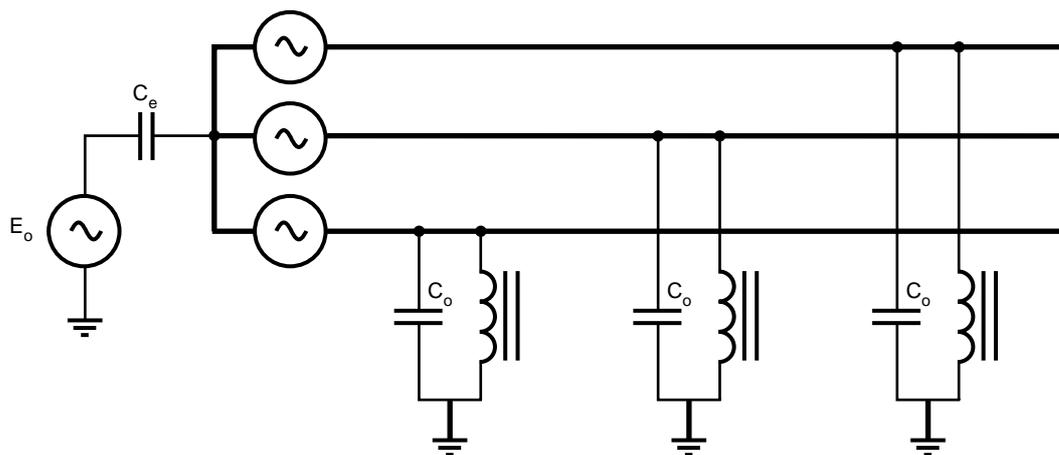
Après que le défaut HT ait disparu, la tension du neutre HT due à un déséquilibre naturel du réseau, peut suffire à entretenir le phénomène.

La ferrorésonance est du type fondamental.

a - Réseau en défaut



b - Schéma équivalent



E_0 : tension homopolaire côté HT

C_e : capacité entre enroulement HT et MT

C_0 : capacité homopolaire du réseau MT

fig. 8 : ferrorésonance de TT entre phase et terre avec transformateur de source à neutres isolés.

Réseau à neutre inductif

Les deux configurations de la **figure 9** sont prédisposées à une ferrorésonance entre une inductance connectée entre le neutre et la terre et les capacités entre phases et terre du réseau.

■ Dans le cas des réseaux à basse tension à neutre isolé de la terre, les normes préconisent (CEI 364) ou imposent (NF C 15-100) la mise en œuvre d'un Contrôleur Permanent d'Isolement (CPI). Certains CPI mesurent l'impédance d'isolement d'un réseau par injection d'un courant continu entre réseau et terre. Ils présentent une impédance interne principalement inductive (faible impédance pour le courant continu et impédance importante à la fréquence du réseau). Ils peuvent contribuer à la ferrorésonance.

Des surtensions peuvent provoquer une montée en potentiel suffisante du point neutre pour déclencher le phénomène de ferrorésonance entre l'inductance du CPI et les capacités entre phase et terre du réseau (cf. **fig. 9a**).

■ En moyenne tension pour limiter les courants de défaut à la terre et favoriser leur autoextinction, une bobine d'inductance L (telle que $3 L C_0 \omega_0^2 = 1$ où C_0 est la capacité homopolaire du réseau MT et ω_0 la pulsation du réseau) est connectée entre le neutre MT d'un transformateur HT/MT et la terre (bobine Petersen).

Il peut y avoir excitation et entrée en résonance du circuit constitué de la mise en série de l'inductance L et de la capacité $3 C_0$ dans les cas suivants :

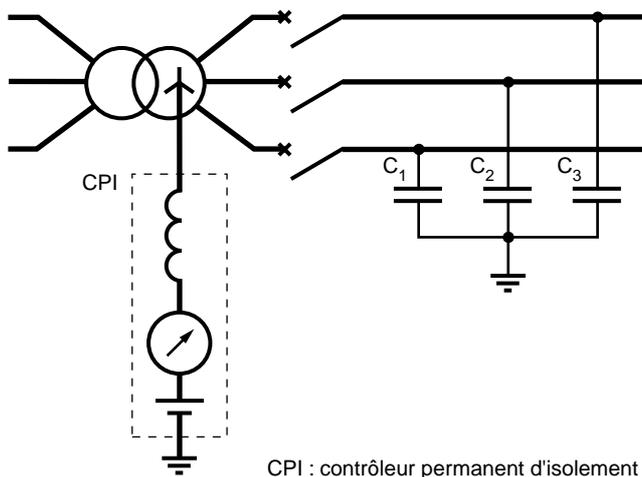
- neutre du transformateur HT/MT mis à la terre côté HT et circulation du courant de défaut HT dans la prise de terre du poste source en cas de défaut HT dans le poste source,
 - saturation du circuit magnétique du transformateur HT/MT,
 - dissymétrie constructive du transformateur,
 - dissymétrie naturelle des capacités (C_1, C_2, C_3 de la **figure 9b**) entre les phases et la terre.
- Ce qui peut provoquer la saturation de la bobine et ainsi déclencher ou entretenir la ferrorésonance.

transformateur alimenté par un réseau très capacitif et de faible puissance de court-circuit

Le phénomène de ferrorésonance peut apparaître lorsqu'un transformateur de puissance, à vide, est alimenté brusquement par une source de puissance de court-circuit faible devant la puissance nominale du transformateur par l'intermédiaire d'un câble ou d'une ligne longue. Ce qui est par exemple le cas lors d'une reprise de service sur un réseau à moyenne tension (de câbles) public urbain ou industriel mais aussi sur des réseaux publics à moyenne tension ruraux très étendus (cf. **fig. 10**) ou dont la proportion de câbles souterrains augmente (fiabilisation et respect de l'environnement).

Cette ferrorésonance parallèle (capacité en parallèle sur l'inductance magnétisante du transformateur) est généralement triphasée, à la fréquence fondamentale, ou de type quasi-périodique.

a - Inductance interne d'un CPI ou d'une impédance de neutre



b - Régime de neutre compensé

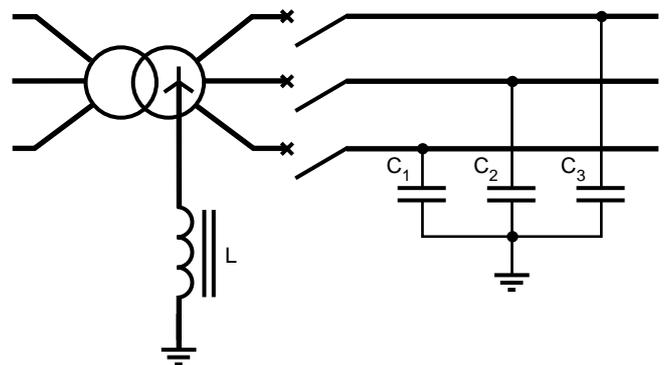


fig. 9 : ferrorésonance dans le cas d'un réseau à neutre inductif.

En résumé :

■ Les configurations potentiellement à risque de ferrorésonance au sein des réseaux électriques sont indénombrables.

■ Les types de ferrorésonance sont variés : monophasée, triphasée, de mode commun ou de mode différentiel.

■ L'expérience permet cependant d'identifier quelques configurations à risques qui méritent une attention particulière, telles que :

□ transformateur de tension entre phase et terre sur un réseau à neutre isolé,

□ liaisons longues et/ou capacitives alimentant un transformateur,
□ protection par fusibles dont la fusion conduit à une coupure non omnipolaire,
□ transformateur de puissance ou de tension à vide ou faiblement chargé.

■ Les phénomènes susceptibles de déclencher la ferrorésonance sont le plus souvent :

□ manœuvre de condensateurs et de lignes à vide,
□ défaut d'isolement,
□ foudre,
□ manœuvre de transformateurs à vide.

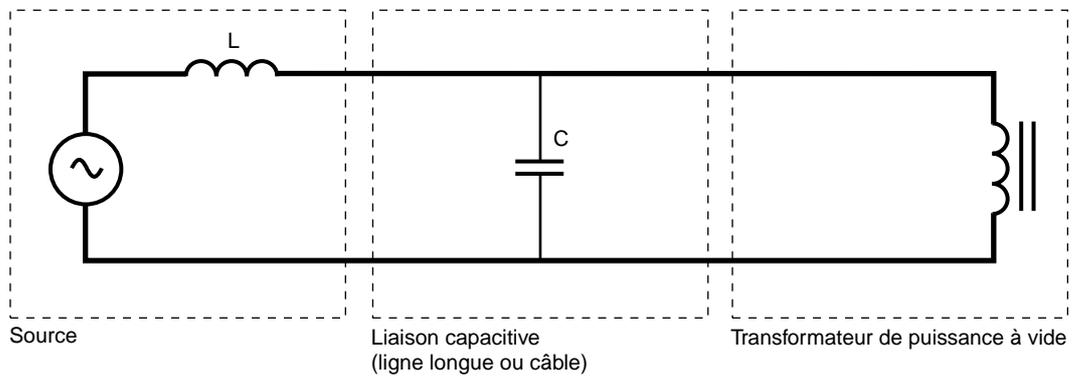


fig. 10 : schéma équivalent d'un transformateur de puissance à vide alimenté par un réseau capacitif.

4 Éviter ou amortir la ferrorésonance

Des mesures pratiques existent qui permettent de se protéger de la ferrorésonance dont les surtensions, les surintensités et les distorsions imposent des contraintes thermiques ou diélectriques parfois dangereuses pour le matériel électrique (destruction, réduction des performances et de la durée de vie des isolations ...).

Les différentes méthodes pratiques sont basées sur les principes suivants :

- éviter, par conception et/ou par des manœuvres appropriées, de se trouver dans une configuration à risque de ferrorésonance. Ce qui peut passer par l'interdiction de certains schémas d'exploitation et/ou de certaines manœuvres en réseau et/ou de certains appareillages,
- éviter que les valeurs des paramètres du réseau se trouvent (même de façon temporaire) dans une zone à risque et si possible prendre une marge de sécurité par rapport à cette ou à ces zones à risques,

■ s'assurer que l'énergie apportée par la source est insuffisante pour entretenir le phénomène. Cette technique consiste en général à introduire des pertes qui en cas de ferrorésonance amortissent le phénomène.

La publication 71 de la CEI [2] précise que les surtensions temporaires de ferrorésonance (et de résonance) « doivent être évitées et limitées » (par un des moyens ci-dessus). « Elles ne doivent normalement pas être considérées comme servant de base aux choix de la tension spécifiée d'un parafoudre, ou à la conception d'isolations sauf si ces moyens ne sont pas suffisants ». Ce qui signifie que la procédure de coordination d'isolement ne prend normalement pas en compte les niveaux de surtensions dues à la ferrorésonance et que par conséquent les parafoudres (dont la tension résiduelle est en générale plus élevée que les surtensions dues à la ferrorésonance) ne constituent pas en principe une protection contre la ferrorésonance.

4.1 Solutions pratiques

L'application de ces principes conduit à préconiser des solutions pratiques, dont quelques unes sont précisées ci dessous dans le cas de quelques configurations typiques propices à l'existence de la ferrorésonance citées au § 3.2.

■ Dans les TT et les TCT bien conçus, des dispositions constructives appropriées sont prises pour neutraliser le phénomène.

Le cas de TT (à une seule extrémité H.T. isolée) connectés entre phase et terre sur un réseau à neutre isolé est considéré en pratique comme étant le cas le plus propice au phénomène de ferrorésonance (provoquée par exemple par les surtensions entre phases saines et terre suite à un défaut entre une phase et la terre). Ce qui justifie dans ce cas la mise en œuvre de dispositions particulières contre la ferrorésonance.

Le cas de TT (à deux extrémités H.T. isolées) connectés entre phases, peut aussi être la source de phénomènes de ferrorésonance lorsqu'un de ces TT est susceptible d'être alimenté même de façon momentanée sur une seule phase. Ce qui peut par exemple être le cas au cours de travaux sous tension, lors de manœuvres non simultanées sur les trois phases, coupure non omnipolaire par fusion d'un fusible sur une seule phase ou lors de rupture d'un conducteur.

Les solutions pratiques sont :

- dans un réseau à neutre isolé, éviter de coupler les primaires de TT en étoile avec neutre (primaire) à la terre, soit en laissant le neutre des primaires des TT isolés soit en utilisant pour les TT le couplage triangle ,
- dans le cas où le couplage étoile des primaires avec neutre à la terre est utilisé (par exemple pour mesurer la tension homopolaire) au sein d'un réseau à neutre isolé ou sur un réseau dont on ne sait pas prévoir le régime de neutre on peut :
 - abaisser par des dispositions constructives la valeur de l'induction de travail du circuit magnétique (à des valeurs de l'ordre de 0,4 à 0,7 T) de sorte que des surtensions ne puissent déclencher le phénomène de ferrorésonance, avec au moins un rapport 2 entre la tension de coude de saturation et la tension assignée,
 - introduire des pertes grâce à une ou plusieurs résistances de charge dont la valeur est suffisamment faible pour amortir de façon efficace le phénomène tout en assurant que la puissance totale consommée respecte les conditions de précision requises.

Méthode de calcul (à effectuer au cas par cas) des résistances de charge :

- Cas des TT à un enroulement secondaire : Une résistance R d'amortissement est placée au

secondaire de chaque TT (cf. **fig. 11**), si la consommation aval n'est pas suffisamment importante. Dans ce cas les résistances absorbent de la puissance en permanence dès que les TT sont sous tension. Les valeurs minimales recommandées pour la valeur de la résistance R et de la puissance P_R de cette résistance sont :

$$R = \frac{U_s^2}{k P_t - P_m}, \quad P_R = \frac{U_s^2}{R}$$

avec :

U_s : tension assignée secondaire (V),
 k : facteur compris entre 0,25 et 1 de manière à ce que les erreurs et les conditions d'emploi restent dans les limites spécifiées par la norme CEI 186 [1] ($k P_t$ est par exemple de l'ordre de 30 W pour une puissance de précision de 50 VA),

P_t : puissance de précision du TT (VA),
 P_m : puissance nécessaire à la mesure (VA)

□ Dans le cas des TT à deux enroulements secondaires (un enroulement secondaire de mesure plus un enroulement secondaire de tension résiduelle aussi appelé enroulement tertiaire), il est recommandé de connecter une résistance aux bornes du triangle ouvert formé par les enroulements tertiaires des trois transformateurs (cf. **fig. 12**). L'avantage de ce dispositif d'amortissement est de ne pas perturber la précision de la mesure et de ne pas introduire de pertes en régime normal (équilibré) mais seulement en cas de régime déséquilibré pour amortir le phénomène.

Les valeurs minimales recommandées pour la valeur de la résistance R et de la puissance P_R de cette résistance sont :

$$R = \frac{3\sqrt{3} U_s^2}{P_e}, \quad P_R = \frac{(3 U_s)^2}{R}$$

avec :

U_s : tension assignée du secondaire du TT, relié à la résistance (V),
 P_e : puissance d'échauffement du secondaire du TT concerné par la résistance (VA)

La puissance d'échauffement (en VA) est la puissance apparente que le TT peut fournir au secondaire sans dépasser les limites des échauffements normaux, sans exigence de précision.

La résistance R doit être choisie de façon à pouvoir dissiper en permanence la puissance P_R .

Exemple :

TT = 10000 : $\sqrt{3}$ - 100 : $\sqrt{3}$ - 100 : 3 V,
 $P_e = 100$ VA
($U_s = 100/3$)

$$R = \frac{3\sqrt{3}(100/3)^2}{100} = 57,7 \Omega,$$

$P_R = (3 \cdot 100/3)^2 / 57,7 = 173$ W
(valeur normalisée immédiatement supérieure à $57,7 \Omega : 2 \times 120 \Omega // , 2 \times 140$ W)

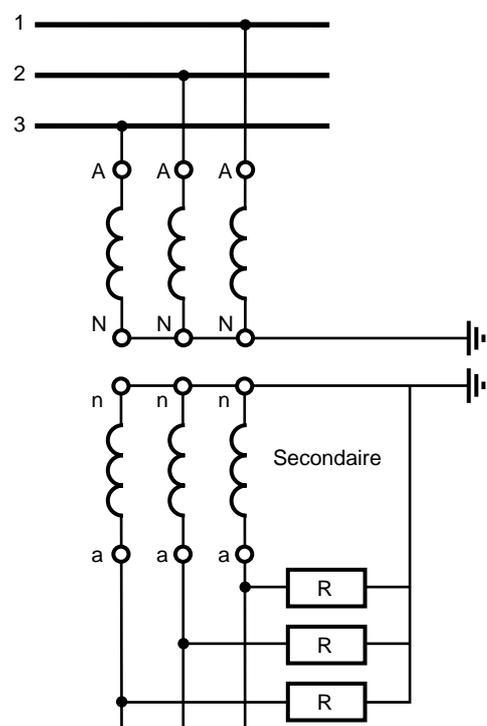


fig. 11 : dispositif de protection contre les risques de ferrorésonance pour TT à un secondaire.

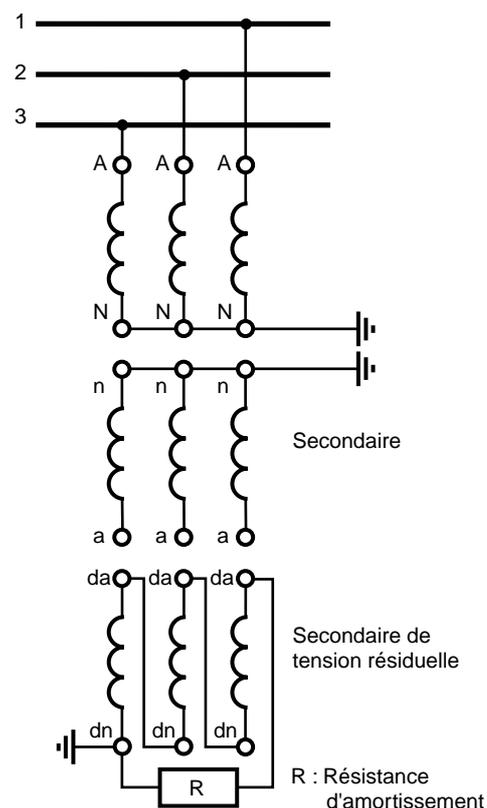
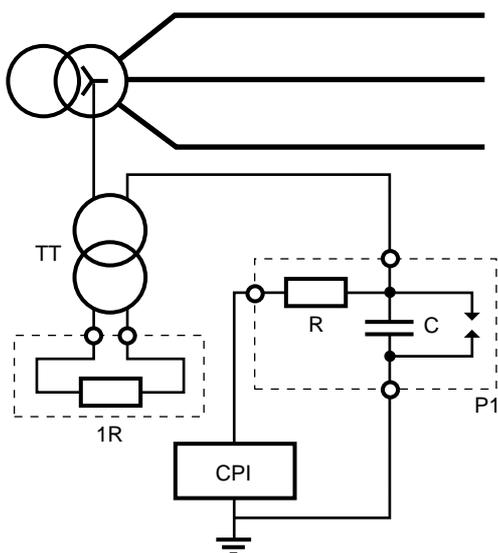


fig. 12 : dispositif de protection contre les risques de ferrorésonance pour TT à deux secondaires.

- Pour éviter qu'un transformateur accidentellement alimenté sur une ou deux phases entre en ferrorésonance (cf. **fig. 7**), des solutions pratiques consistent à :
 - ramener la valeur de la capacité entre disjoncteur et transformateur en dessous de sa valeur critique en utilisant par exemple une cellule disjoncteur plus proche du transformateur, ou disposer de disjoncteurs juste en amont des transformateurs et ne les fermer qu'après rétablissement de la tension sur les trois phases,
 - éviter d'exploiter un transformateur débitant une puissance active inférieure à 10% de sa puissance apparente nominale,
 - éviter les enclenchements à vide,
 - interdire les manœuvres monophasées ou la protection par fusible dont la fusion conduit à une coupure unipolaire,
 - interdire les travaux sous tension dans le cas d'un ensemble câble-transformateur dès que la longueur du câble dépasse une certaine longueur critique,
 - mise à la terre du neutre du poste d'alimentation par résistance,
 - mise à la terre directe du neutre (permanente ou seulement aux moments des manœuvres d'enclenchement et de déclenchement) d'un transformateur dont le primaire est en étoile (neutre accessible),
- Cas des réseaux à neutre isolé
 Pour éviter le risque de ferrorésonance avec des CPI qui seraient trop inductifs, une impédance peut être installée entre le neutre du transformateur et la terre. C'est la solution

- « neutre impédant ». Une impédance dont la valeur purement résistive à 50 Hz est de l'ordre de 1500Ω est préconisée dans le cas d'un réseau à basse tension court alimenté par un poste MT/BT [4].
- En MT, les CPI à injection de courant continu sont associés selon la tension, soit à un TT chargé par une résistance (cf. **fig. 13**) soit à une résistance montée en série avec le CPI ($U_n < 5,5 \text{ kV}$).
- Le point étoile des primaires de tous les autres jeux de TT montés en étoile et raccordés sur le même réseau à neutre isolé, doivent aussi être mis à la terre par l'intermédiaire d'une capacité (platine P1). Cette disposition est souvent oubliée lors des extensions et dans les sous-tableaux.
- Cas des réseaux MT à neutre inductif (cf. **fig. 9b**)
 Dans le cas d'un réseau à neutre compensé, on peut :
 - surcompenser le courant capacitif du réseau en désaccordant l'inductance de neutre,
 - rajouter une composante résistive en abaissant le facteur de qualité de la bobine.
 La mesure prise ne doit cependant pas compromettre l'autoextinction des défauts d'isolement à la terre, qui est un des objectifs du neutre compensé.
- Dans le cas d'un transformateur alimenté par un réseau capacitif (cf. **fig. 10**), la meilleure solution consiste à éviter de se trouver dans la configuration à risque où la puissance active débitée est inférieure à 10 % de la puissance nominale du transformateur. Ce risque est important pendant les périodes de faible charge (congés, nuit).

a - Neutre accessible



b - Neutre non accessible

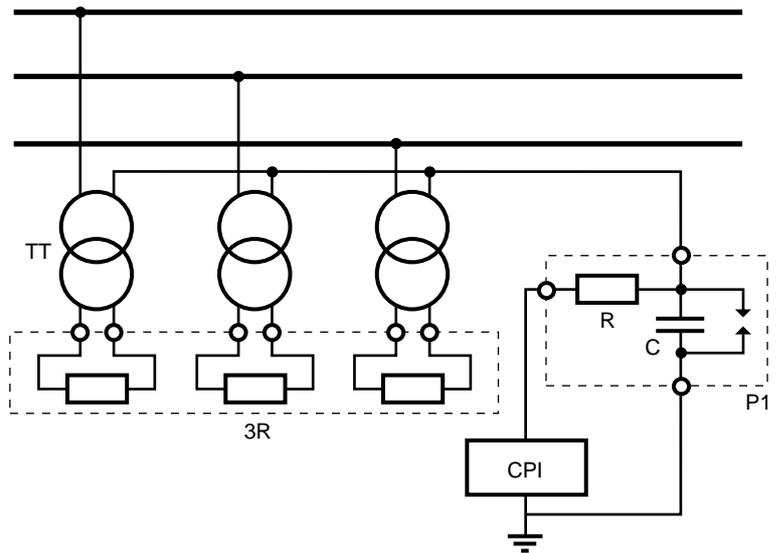


fig. 13 : auxiliaires de CPI.

4.2 Critères d'évaluation pratiques

Les systèmes d'équations décrivant le comportement des circuits ferrorésonants ne peuvent en général pas se résoudre de façon analytique. Le recours à des méthodes numériques est alors nécessaire. Dans le cas du circuit ferrorésonant série, il est cependant possible de prédire de façon analytique l'existence de la ferrorésonance périodique fondamentale (à la pulsation nominale ω_0 du réseau) et sous-harmonique de rang n (de pulsation ω_0/n avec n entier). L est la valeur de l'inductance non linéaire en régime non saturé et L_s correspond au régime saturé.

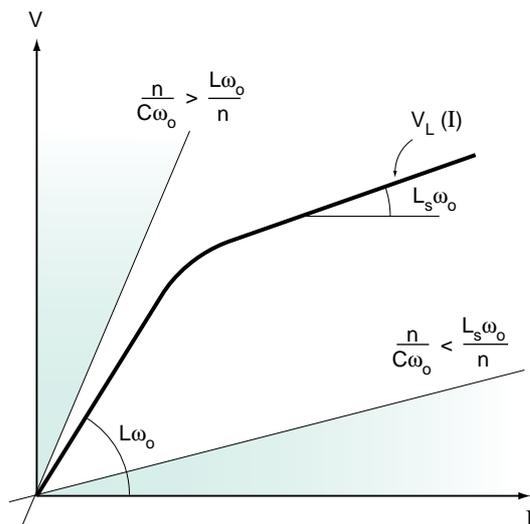


fig. 14 : valeurs de C incompatibles avec la ferrorésonance périodique.

Le phénomène de ferrorésonance périodique est impossible si un des critères suivants est vérifié :

- $\frac{n}{C\omega_0} > \frac{L\omega_0}{n}$

n est le rang du sous-harmonique. (n est égal à un dans le cas de la ferrorésonance fondamentale)

- $\frac{n}{C\omega_0} < \frac{L_s\omega_0}{n}$

Ces deux critères peuvent être illustrés par la figure 14 ; la courbe de magnétisation permet de connaître L et L_s .

□ La valeur de L_s peut être fournie par le constructeur.

□ La valeur de l'inductance magnétisante d'un TT ou de l'inductance magnétisante cyclique directe d'un transformateur de puissance monophasé est :

$$L = \frac{1}{\omega_0} \frac{U_n}{\sqrt{I_0^2 - (P_0/U_n)^2}} \text{ (mH)}$$

Avec :

U_n : tension nominale (kV),
 I_0 : courant à vide sous U_n (A),
 P_0 : pertes à vide sous U_n (kW).

□ Ordres de grandeurs de valeurs de capacité
 Les ordres de grandeurs des capacités homopolaires des câbles souterrains à champ radial à isolation synthétique et des lignes aériennes sont donnés figure 15 .

Dans le cas des câbles le lecteur pourra utilement se reporter aux formules analytiques des constructeurs de câbles ou aux tableaux de valeurs de la norme NF C 33-220.

□ Enfin, pour que la ferrorésonance soit entretenue, il faut que le couplage à la source soit capable de compenser les pertes du circuit [10].

Câbles à champ radial à isolation synthétique				Lignes aériennes				
Tension assignée Uo/U(Um) (kV)	Section (mm ²)	PE	EPR	20 kV	90 kV	150 kV	220 kV	400 kV 2 ternes + câble de garde
5,8/10 (12)	16	0,17	0,21	5 x 10 ⁻³	4,8 x 10 ⁻³	5,6 x 10 ⁻³	5,5 x 10 ⁻³	7,1 x 10 ⁻³
	240	0,43	0,52					
8,7/15 (17,5)	25	0,16	0,19					
	240	0,34	0,41					
12/20 (24)	35	0,15	0,18					
	240	0,28	0,35					

fig. 15 : capacités homopolaires (en µF/km) des câbles et des lignes (ordres de grandeurs).

5 Études pour prévoir ou comprendre

L'idéal est de prédire les risques de ferrorésonance pour l'ensemble des valeurs possibles des paramètres d'un réseau dans des conditions normales ou exceptionnelles d'exploitation et prenant en compte des modifications futures de l'installation. Il est alors possible de connaître la

marge de sécurité par rapport à une zone voisine dangereuse et de prendre des contre-mesures. Une réponse fiable et crédible à cette question passe par la mise en œuvre de méthodes numériques bien adaptées à l'étude de certains types de régimes ferrorésonants.

5.1 Exemple d'étude

La démarche ainsi que la mise en œuvre et l'exploitation pratique de ces méthodes sont illustrées ci-dessous.

■ Le cas étudié

Afin de réduire les temps de coupure en cas d'incident, les exploitants de réseaux publics ruraux MT télécommandent des interrupteur-sectionneurs.

La **figure 16** représente le cas d'une armoire de coupure télécommandée (ACT) posée au sol et reliée à un réseau aérien MT par liaison aéro-souterraine.

Un transformateur de potentiel TT relié entre deux phases (phase 1 et phase 3) assure l'alimentation BT autonome du coffret de

télécommande de type ITI (interface de télécommande d'interrupteur).

L'étude est motivée par la destruction par explosion de TT dans différentes installations du même type, pendant leur alimentation effectuée par des travaux sous tension (pose sous tension des bretelles de raccordement de la ligne aérienne à une des deux liaisons aéro-souterraines).

L'explosion du TT a été constatée 5 à 55 minutes (selon les cas) après la pose de la bretelle de la phase 1 du poteau ① (interrupteur-sectionneur fermé et bretelles du poteau ② non posées).

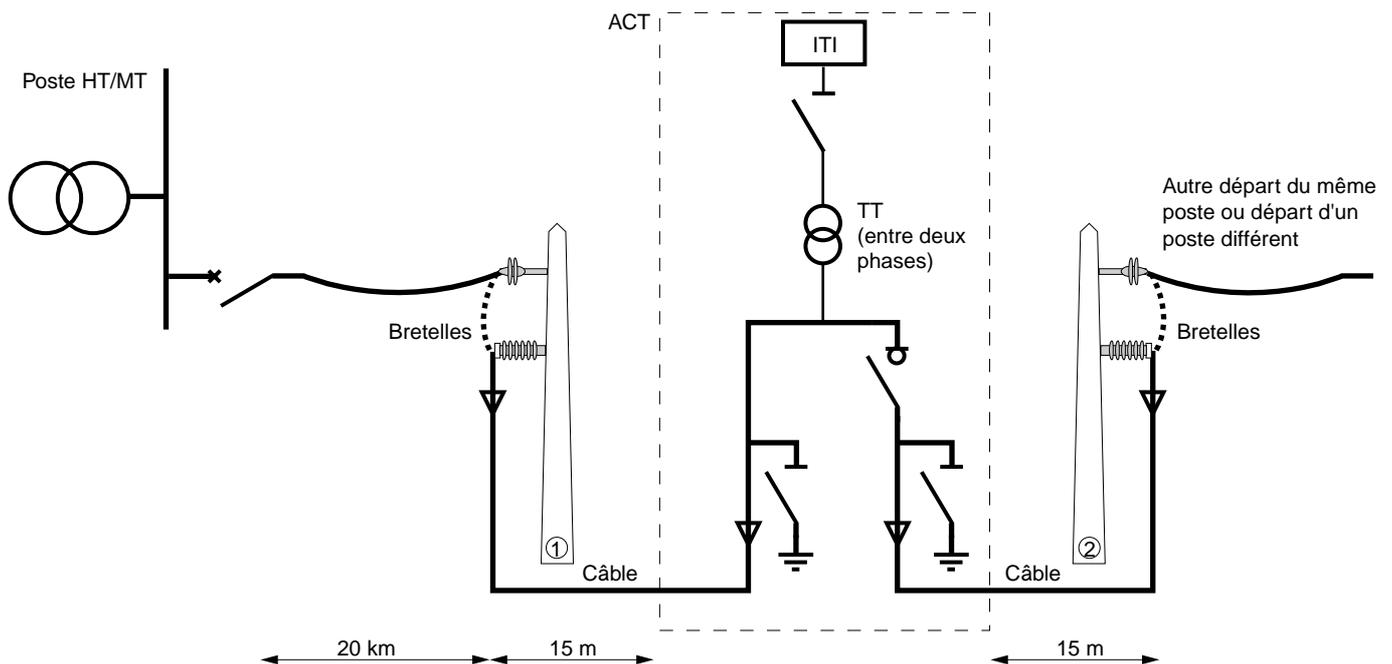


fig. 16 : armoire de coupure télécommandée (ACT), posée au sol, reliée à un réseau MT aérien.

Paramètres du réseau étudié :

TT : 20000/230 V, 100 VA,

Poste HT/MT : 63 kV/21 kV, 10 MVA,

Résistance de mise à la terre du neutre : 40Ω ,
Ligne aérienne de 20 km entre poste HT/MT et poteau ①,

Liaisons ACT-poteau : 15 m de câble (champ radial), 150 mm^2 , Aluminium.

Aux fréquences de travail (50 Hz et sous-harmoniques), la ligne aérienne peut être modélisée par son impédance longitudinale. Le schéma équivalent est alors celui de la **figure 17a**.

Avec :

$e(t)$: source de tension sinusoïdale

$e(t) = E \cos(100 \pi t)$

avec $E = 21000 \sqrt{2} / \sqrt{3} = 17000$.

R : résistance de neutre + résistance propre du transformateur HT/MT + résistance propre longitudinale de la ligne aérienne.

L : inductance propre du transformateur HT/MT + inductance propre longitudinale de la ligne aérienne.

C_0 : capacité homopolaire des 30 m de câble ($C_0 = 6,7 \text{ nF}$).

L_p : inductance (non linéaire) de magnétisation du TT vue du primaire. Sa caractéristique est déterminée à partir de mesures tension-courant (courbe de magnétisation) effectuées sur le TT à vide.

R_p : résistance de l'enroulement primaire.

R_2 : résistance équivalente aux pertes fer et aux pertes par hystérésis. R_2 est supposée constante et indépendante de la tension efficace et du flux crête.

Ce circuit peut être simplifié sous la forme du schéma représenté **figure 17b**. Ce circuit qui est un circuit de ferrorésonance série est donc propice à la ferrorésonance.

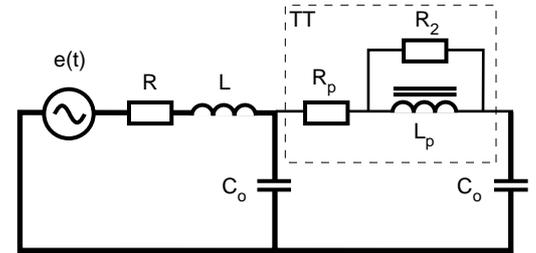
L'application de méthodes adaptées permet d'étudier la possibilité de ferrorésonance entre le TT et la capacité phase-terre des 30 m de câble connectés à la phase libre (non connectée à la source) du TT.

■ Détermination des zones à risques

Le diagramme de bifurcation $\hat{\phi}(E)$ de la **figure 18** montre que pour les valeurs des paramètres du réseau un régime ferrorésonant (point M_f) est possible à la tension simple du réseau (17 kV).

La zone à risque est située au dessus de la ligne de bifurcation en trait vert représentée **figure 19** dans le plan (C,E) (lieu des points M_1 du diagramme de bifurcation de la **figure 18**). La valeur de capacité de $6,7 \text{ nF}$ se situe largement dans la zone à risques.

a - Schéma monophasé équivalent



b - Schéma simplifié

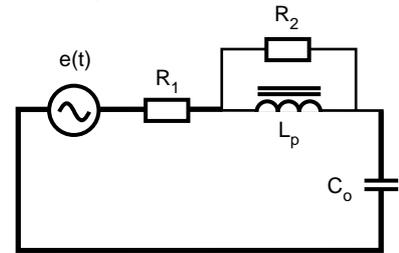


fig. 17 : pose de la bretelle de la phase 1 du poteau ①.

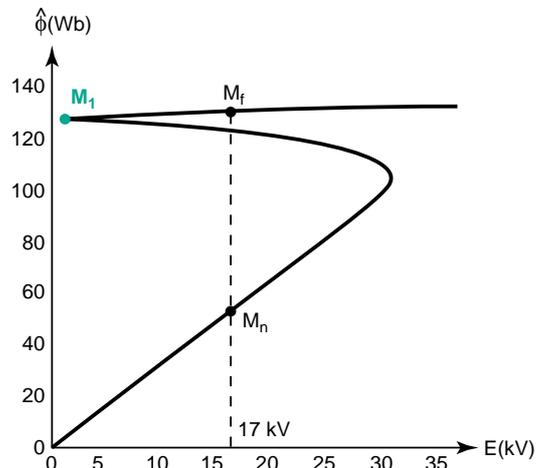


fig. 18 : diagramme de bifurcation.

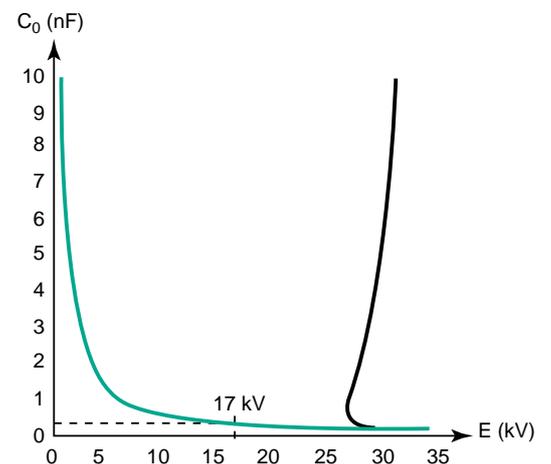


fig. 19 : lignes de bifurcation.

Cette condition ne suffit pas à conclure que le phénomène peut exister en pratique.

■ Simulations numériques temporelles

La question est alors de savoir si les valeurs de conditions initiales possibles permettent le déclenchement de la ferrorésonance. Une simulation numérique temporelle du circuit triphasé permet de répondre.

Dans le cas qui nous intéresse la capacité du câble est déchargée et les conditions initiales sont donc principalement déterminées par les conditions de mise sous tension d'une phase de la liaison aéro-souterraine. Ces conditions de mises sous tension dépendent directement de l'opérateur et ne sont pas comparables à celles d'un enclenchement par interrupteur.

Les formes d'ondes obtenues par simulations et représentées **figures 20a et 20b** démontrent que la procédure de travaux sous tension décrite précédemment peut conduire à un régime permanent ferrorésonant.

■ Tenue du matériel aux contraintes

Il faut ensuite déterminer si ce régime est dangereux pour le matériel et permet d'expliquer la destruction du TT. Les surtensions calculées aux bornes du TT en régime ferrorésonant établi étant inférieures à la tension assignée de tenue du TT à la fréquence industrielle (50 kVeff/1 mn, soit 70 kV crête), il faut étudier la possibilité de destruction thermique et/ou mécanique.

La tension de court-circuit du TT étant de 2.5 %, il supporte par construction au minimum les effets mécaniques et thermiques d'un courant de court-circuit de $40 I_n$ pendant 1 s (CEI 186). Ce qui permet de calculer le temps t_{min} de tenue thermique sous I_{eff} :

$$(40 I_n)^2 \times 1 \text{ s} = (I_{eff})^2 \times t_{min}$$

$$\text{d'où } t = \frac{(40 \times 100 / 20000)^2}{(0,13)^2} = 2,4 \text{ s}$$

Il existe donc au moins un régime ferrorésonant qui conduit à la destruction du TT par effet thermique. Il est nécessaire de prendre des précautions particulières.

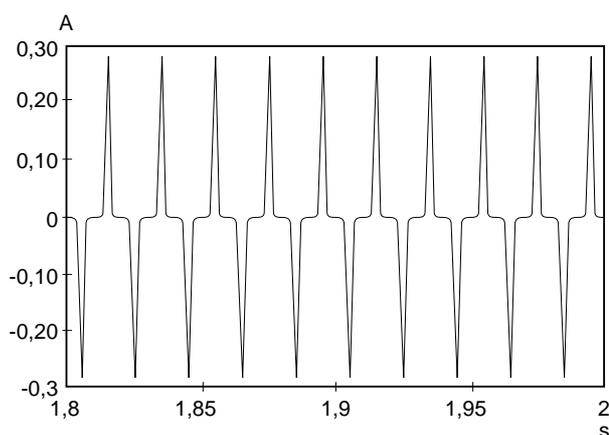
■ Solutions

Dans ce cas précis il est possible de proposer des méthodes d'amélioration telles que :

- charger le secondaire du TT, des méthodes numériques adaptées permettant de déterminer la valeur de cette charge,
- effectuer les manœuvres hors tension,
- modifier la procédure d'enclenchement. Il s'agit ici de mettre tout d'abord en place les trois bretelles du poteau ②, l'interrupteur-sectionneur étant ouvert. L'interrupteur est alors fermé sur les trois phases alimentant simultanément les deux phases du TT. Les trois bretelles du poteau ① peuvent ensuite être posées.

Les méthodes mises en œuvre dans cette étude, ainsi que d'autres, sont présentées dans ce qui suit.

a - Courant primaire du TT



b - Tension primaire du TT

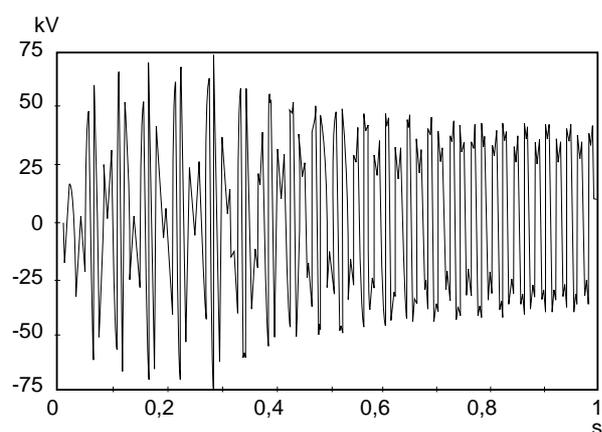


fig. 20 : simulation numérique temporelle.

5.2 Modélisation, approche mathématique

Les moyens d'étude des problèmes électromagnétiques transitoires et de la ferrorésonance sont :

■ la simulation analogique

Basée sur une représentation en modèle réduit des éléments du réseau, elle présente l'avantage d'obtenir des résultats en temps réel mais l'inconvénient de la difficulté de représenter un cas réel avec précision.

■ la simulation numérique temporelle en transitoire

La résolution du système d'équations mathématiques qui décrit le comportement du réseau nécessite l'utilisation d'outils informatiques. Dans le cas de la ferrorésonance les régimes transitoires étant généralement longs, les temps de simulation sont importants et les études coûteuses.

Le phénomène de ferrorésonance étant très sensible aux valeurs des paramètres et aux conditions initiales qui sont mal connues en pratique, il faut faire une étude pour chaque combinaison possible. Ce qui n'est pas réaliste. Les méthodes précédemment citées ne sont donc pas bien adaptées à la recherche d'une vision globale du comportement d'un réseau. Pour palier les inconvénients de ces méthodes les mathématiciens ont développé les méthodes suivantes :

■ méthodes de calcul direct du régime permanent

Elles permettent de calculer les solutions en régime permanent sans passer par le calcul du régime transitoire généralement long dans le cas de la ferrorésonance.

■ méthode de continuation

Le cadre mathématique adapté à l'étude globale du comportement des systèmes dynamiques est la théorie des bifurcations dont l'outil principal est la méthode de continuation. Utilisée conjointement avec les méthodes de calcul direct du régime permanent, elle permet de déterminer des zones à risques.

A noter que la simulation numérique temporelle conserve un intérêt certain. Elle permet de :

- confirmer, les résultats d'une autre méthode, pour une configuration et des valeurs numériques des paramètres données,
- préciser les formes d'ondes ainsi que les niveaux de surtensions et de surintensités correspondantes, grâce à une modélisation fine des éléments du réseau.

Méthodes numériques de calcul du régime permanent

Les mathématiciens ont développé des méthodes fréquentielles ou temporelles qui permettent de calculer les solutions en régime permanent sans passer par le calcul du régime transitoire.

Les méthodes suivantes permettent d'étudier la ferrorésonance périodique (fondamentale sous-harmonique).

La principale méthode fréquentielle est la méthode de Galerkin.

Les principales méthodes temporelles sont la méthode du point fixe de l'application de Poincaré et la méthode des perturbations.

■ Méthode de Galerkin

Cette méthode consiste à chercher une solution approchée du système d'équations différentielles non linéaires décrivant le comportement du réseau. La solution est décomposée sous la forme d'une série de Fourier limitée à l'ordre k de façon à rechercher les solutions périodiques. L'inconnue est remplacée par son expression. Ce qui conduit à un système de $2k+1$ équations à $2k+1$ inconnues (les coefficients du développement en série de Fourier).

■ Méthode du point fixe de l'application de Poincaré

La solution étant périodique de période nT , la méthode consiste à chercher de façon itérative une solution invariante par une simulation numérique du système sur une période nT .

■ Méthode des perturbations

La méthode consiste à simplifier le système d'équations décrivant le comportement du circuit en annulant certains paramètres tels que les pertes et/ou l'amplitude de la source de tension. Après avoir résolu l'équation ainsi obtenue, les termes annulés sont introduits par un développement limité autour de la solution précédemment obtenue. Cette méthode est particulièrement intéressante lorsqu'elle est associée à la méthode de continuation.

Méthode de continuation

Cette méthode numérique basée sur un procédé itératif permet l'étude de l'influence d'un paramètre (par exemple l'amplitude de la source de tension) sur les solutions (par exemple le flux dans un transformateur) des équations décrivant le système (par exemple le réseau électrique). Les points de la courbe des solutions sont obtenus de proche en proche à partir d'une solution connue :

Connaissant une solution x_0 correspondant à la valeur E_0 du paramètre choisi, la solution voisine

x_1 est obtenue en initialisant la résolution du système par la solution x_0 et la valeur voisine E_1 du paramètre. La courbe ainsi obtenue de proche en proche s'appelle diagramme de bifurcation.

Dans le cas du circuit ferrorésonant, la méthode de résolution utilisée est une des méthodes de calcul direct du régime permanent, ce qui permet de s'affranchir des conditions initiales.

■ Diagrammes de bifurcation.

Pour le circuit ferrorésonant série de la **figure 21a** des exemples de diagrammes de bifurcation selon l'amplitude E de la source de tension pour deux valeurs (R_a et R_b) de la résistance parallèle R_2 sont tracés **figure 21b**. Pour une valeur de R_2 donnée ces courbes mettent en évidence deux points particuliers (M_1 et M_2 pour R_2 égale à R_a) appelés points limites pour lesquels il y a changement de stabilité (cf. § 2.2).

■ Lignes de bifurcation.

Pour chacun des points M_1 et M_2 il est possible de déterminer la valeur de E correspondante appelée valeur critique (E_1 pour le point M_1 et E_2 pour le point M_2).

Le tracé, dans le plan de deux paramètres par exemple E et R_2 , des couples (E_1, R_2) et (E_2, R_2) correspondant aux points singuliers pour différentes valeurs de R_2 , permet d'obtenir des courbes (cf. **fig. 21c**) qui représentent la frontière entre deux régimes de fonctionnement différents, le régime normal et le régime ferrorésonant. Les courbes ainsi obtenues s'appellent lignes de bifurcation.

Il est aussi possible de tracer des lignes de bifurcation dans le plan de différents couples de paramètres tels que par exemple (R_2, C) ou (R_1, E).

■ Isolats

Les diagrammes de bifurcation de la **figure 21b** correspondent au cas de la ferrorésonance fondamentale. Ces courbes passent en effet par la solution évidente (0,0). Point à partir duquel l'utilisateur peut d'ailleurs initialiser la méthode de continuation.

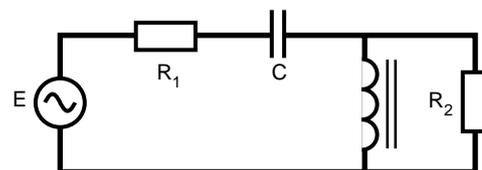
Par contre, la continuation des isolats, qui sont des courbes fermées, est plus délicate. Il faut en effet connaître une solution appartenant à cette courbe isolée (isolat) pour initialiser la méthode de continuation. L'utilisation de la méthode des perturbations permet d'obtenir une telle solution. Les courbes obtenues correspondent à une fréquence différente de celle de la source de tension, comme par exemple l'isolat sous-harmonique représenté **figure 22**.

Pour une tension E comprise entre les extrémités de l'isolat la moindre perturbation peut faire passer le système de la courbe verte à la courbe noire et inversement.

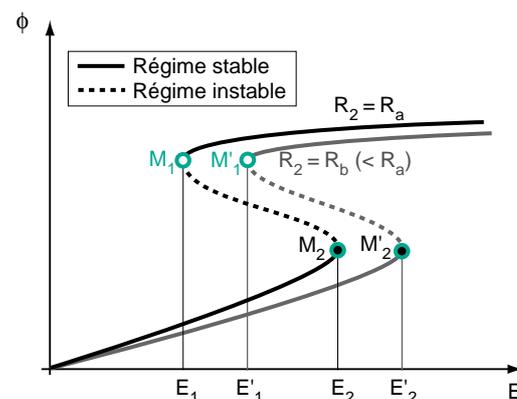
■ Utilisation pratique des diagrammes de bifurcation

Les valeurs des paramètres du circuit étant données (et en particulier R_2 égale à R_a) la

a - Circuit ferrorésonant série



b - Diagramme de bifurcation selon E



c - Lignes de bifurcation dans le plan R2, E

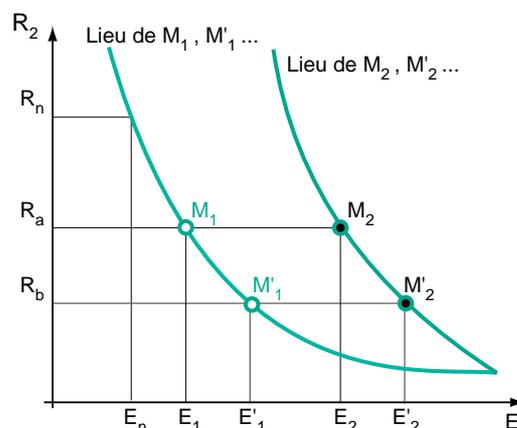


fig. 21 : diagrammes et lignes de bifurcation (ferrorésonance fondamentale).

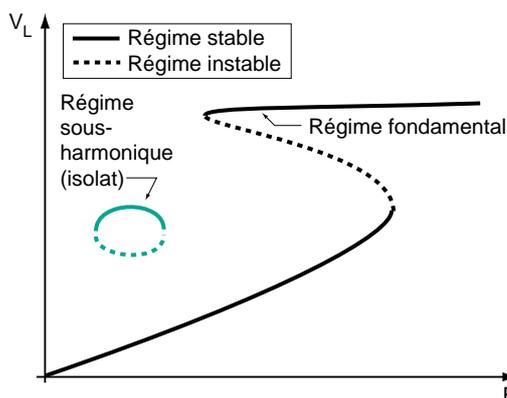


fig. 22 : isolat d'un régime sous-harmonique.

figure 21b montre que tant que E reste inférieure à E_1 , un régime permanent ferrorésonant fondamental ne peut se maintenir.

■ Utilisation pratique des lignes de bifurcation

Si dans toutes les conditions d'exploitation du réseau, l'amplitude E de la source de tension est inférieure à E_n , la **figure 21c** montre qu'une valeur de résistance de R_2 inférieure à R_n garantit l'absence de ferrorésonance fondamentale.

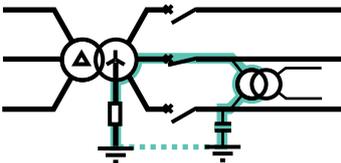
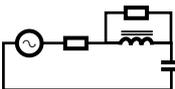
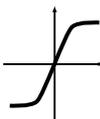
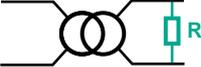
Étant donnée l'imprécision sur les valeurs numériques des paramètres du réseau, la

démarche pratique consiste en général à prendre une marge de sécurité par rapport aux domaines à risques.

Il faut préciser que tous les régimes situés dans les zones à risques, dont les frontières sont constituées par les lignes de bifurcations, ne sont pas forcément atteints en pratique car il faut que des conditions initiales particulières soient vérifiées. Des simulations numériques temporelles permettent de déterminer si ces conditions initiales sont possibles dans la réalité.

5.3 Récapitulation

Voici le plan d'une étude de ferrorésonance menée selon les méthodes qui viennent d'être exposées. Les différentes étapes sont rangées par ordre d'exécution dans le tableau ci-dessous.

1 - Identification d'une configuration à risque	
2 - Simplification du circuit	
3 - Détermination des paramètres du réseau. - Caractéristique non-linéaire de l'inductance. - Variations et tolérances de R et C.	
4 - Détermination des domaines à risques (vue globale). - Méthode de continuation. - Méthode de calcul du régime permanent.	
5 - En pratique, les conditions initiales conduisent-elles à un domaine à risque ? Simulations numériques temporelles.	
6 - Conséquences sur la tenue thermique, mécanique et diélectrique du matériel.	
7 - Proposition de solutions.	

6 Conclusion

Le risque de ferrorésonance est à prendre en compte dès la conception d'une installation électrique. Il faut également rester vigilant en situation de maintenance ou d'extension de réseau. A la base de la maîtrise des risques il faut connaître les configurations dangereuses et les conditions d'existence du phénomène. Si une configuration jugée critique est inévitable, seule une étude approfondie est à même d'apprécier les risques et d'évaluer l'efficacité des remèdes à apporter.

Le concepteur-installateur de réseau HT et BT, a eu ici un aperçu des précautions à prendre pour éviter ce phénomène curieux et souvent dangereux. Cela doit lui permettre de dialoguer avec des spécialistes.

L'exploitant a trouvé quelques éléments de diagnostic, grâce auxquels il saura suspecter à juste titre la ferrorésonance. Lui attribuer toute avarie inexpliquée serait abusif !

Il semble intéressant de rappeler en synthèse les événements déclencheurs de la ferrorésonance et les configurations à risques :

- Quelques exemples de phénomènes susceptibles de déclencher la ferrorésonance :
 - manœuvres de condensateurs,
 - défauts d'isolement,
 - foudre,
 - manœuvres de transformateurs.
- Quelques configurations à risques qui méritent une attention particulière :
 - transformateur de tension (TT) entre phase et terre d'un réseau à neutre isolé,
 - liaisons longues et/ou capacitives alimentant un transformateur,
 - protection par fusibles dont la fusion conduit à une coupure non omnipolaire,
 - transformateur de tension ou de puissance à vide ou faiblement chargé,
 - transformateur de tension opérant à la limite de la saturation,
 - transformateur de tension surdimensionné en puissance.

Le lecteur désireux de trouver des approfondissements ou des études de cas est invité à se reporter à l'abondante bibliographie sur le sujet.

Annexe 1 : Bibliographie

Normes

[1] CEI 186 : Transformateurs de tension.

[2] CEI 71 : Coordination de l'isolement.

Cahiers Techniques

[3] Mise à la terre du neutre dans un réseau industriel haute tension, F. SAUTRIAU, Cahier Technique Merlin Gerin n°62.

[4] Les schémas des liaisons à la terre en BT (régimes du neutre), B. LACROIX, R. CALVAS, Cahier Technique Merlin Gerin n°172.

[5] Surtensions et coordination de l'isolement, D. FULCHIRON, Cahier Technique Merlin Gerin n°151.

[6] Les perturbations harmoniques dans les réseaux industriels, et leur traitement, P. ROCCIA, N. QUILLON, Cahier Technique Merlin Gerin n° 152.

[7] Harmoniques : convertisseurs propres et compensateurs actifs, E. BETTEGA, J.N. FIORINA, Cahier Technique Merlin Gerin n° 183.

Ouvrages divers

[8] Revue des phénomènes de ferrorésonance dans les réseaux haute tension et présentation d'un modèle de transformateur de tension pour leur prédétermination, N. GERMAY, S. MASTERO, J. VROMAN, CIGRE Session de 1974-21-29 août.

[9] Ferroresonance in a transformer switched with an EHV line, E.J. DOLAN, D.A. GILLIES, E.W. KIMBARK, IEEE Power Apparatus and Systems, 1972.

[10] Contribution théorique et expérimentale à l'étude des phénomènes de ferrorésonance monophasée, P. MAHY, SRBE, mars 1972.

[11] Transformateurs de mesure-Généralités. Théorie. Fonctionnement, J.P. DUPRAZ, D 4720, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique.

[12] Ferroresonance study using Galerkin Method with pseudo-arclength continuation method, G. KIENY, G. LE ROY, A. SBAI, IEEE PWD, Vol. 6, No.4, October 1991.

[13] Ferrorésonance dans les réseaux, C. KIENY, A. SBAI, D 4745, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique.

Annexe 2 : Guide de choix des résistances de charge des TT

Secondaires de tension résiduelle en triangle ouvert, fermé sur une résistance.

Tension secondaire assignée	Puissance d'échauffement du secondaire concerné par la résistance (VA)	Résistance minimale calculée (Ω)	Choix pratique (dans la série 140 W)	
			Résistance normalisée (Ω)	Puissance dissipée par la résistance (W)
$\frac{100}{3}$	50	115,5	120	83
	100	57,7	2 x 120 en //	2 x 83
	200	28,9	2 x 100 en //	2 x 100
$\frac{110}{3}$	50	139,7	150	80,7
	100	69,9	2 x 150 en //	2 x 80,7
	200	34,9	2 x 100 en //	2 x 121
$\frac{100}{\sqrt{3}}$	50	346,4	390	77
	100	173,2	2 x 390 en //	2 x 77
	200	86,6	2 x 220 en // 3 x 390 en //	2 x 136 3 x 77
$\frac{110}{\sqrt{3}}$	50	419,2	470	77
	100	209,6	2 x 470 en //	2 x 77
	200	140,8	2 x 390 en //	2 x 93

