INTRODUCTION

Dans le domaine de la distribution électrique publique haute tension, la qualité de la fourniture de l'énergie ainsi que le respect de l'environnement sont à prendre en compte aujourd'hui avec de plus en plus de considération.
Les contraintes environnementales liées au respect des sites naturels, les conditions climatiques extrêmes ainsi que les exigences des clients en terme de qualité, ont forcé le Réseau de Transport d'Électricité (RTE) à enfouir un nombre de plus en plus important de lignes électrique.

Le comportement différent de ces réseaux souterrains, fait apparaître des problèmes de surtensions au niveau des clients basse tension et rend inadapté les protections jusqu'alors utilisées.

Les défauts sur les réseaux sont de 70% à 80% du type phase terre. Une évolution des schémas de liaison à la terre ainsi que la mise en place de nouvelles protections a été nécessaire pour satisfaire aux critères de qualité et de sécurité.

L'objet de l'étude est de présenter le problème, puis de justifier les solutions qui sont mises en œuvre.

PRESENTATION

L'étude se limite à un poste source alimentant plusieurs départs haute tension. Le schéma correspondant est donné en annexe 1.
Le départ 1 représente l'alimentation de clients basse tension.
Le départ 2 représente l'alimentation d'un clients haute tension.
Le départ 3 représente la ligne équivalente à tous les autres départs.
Les courants consommés par les charges ne seront pas pris en considération, seuls les courants de défauts seront étudiés.
Les impédances des lignes sont négligées, les transformateurs sont considérés parfait.

NOTATIONS UTILISEES

Grandeur instantanée : **v (t)**
Grandeur efficace : **V**
Grandeur complexe : $\underline{V}$
Grandeur complexe conjuguée : $\underline{V}^*$

Système triphasé : $\underline{V}_1, \underline{V}_2, \underline{V}_3$ $\quad \underline{V}_1 = V$ $\quad a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$
$\underline{V}_2 = a^2 V$
$\underline{V}_3 = a V$

Puissance en triphasé : $\underline{S} = 3\, \underline{V}\, \underline{I}^*$

Composantes symétriques :

$$\underline{V}_1 = \underline{V}_d + \underline{V}_i + \underline{V}_0$$
$$\underline{V}_2 = a^2\underline{V}_d + a\, \underline{V}_i + \underline{V}_0$$
$$\underline{V}_3 = a\, \underline{V}_d + a^2\underline{V}_i + \underline{V}_0$$

$$3\, \underline{V}_d = \underline{V}_1 + a\, \underline{V}_2 + a^2\underline{V}_3$$
$$3\, \underline{V}_i = \underline{V}_1 + a^2\underline{V}_2 + a\, \underline{V}_3$$
$$3\, \underline{V}_0 = \underline{V}_1 + \underline{V}_2 + \underline{V}_3$$

Grandeur résiduelle : $\underline{V}_r = \underline{V}_1 + \underline{V}_2 + \underline{V}_3 = 3\underline{V}_0$

BPN : .....bobine de point neutre permettant la réalisation du neutre ;
PAH : .....protection ampèremétrique homopolaire (déclenchement sur seuil de courant résiduel) ;
PWH : .....protection wattmétrique homopolaire (déclenchement sur seuil de puissance résiduelle) ;
$\mathbf{B_1, B_2, B_3, B_4}$: .....bobines d'accord
$\mathbf{R_1, R_2}$: .....résistances de contrôle du courant actif de défaut ;
$\mathbf{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6}$: .....interrupteurs de commande des bobines d'accord et des résistances R_1, R_2.

$\mathbf{R_{nHT}}$: .....résistance de la liaison du neutre HTA à la terre ;
$\mathbf{R_{nBT}}$: .....résistance de la liaison du neutre BT à la terre ;
$\mathbf{R_u}$: .....résistance de la prise de terre d'un client BT ;
$\mathbf{R_m}$: .....résistance de la prise de terre des masses du poste HT / BT ;
$\mathbf{R_d}$:.....résistance de défaut ;
k : .....coefficient de couplage des terres R_m et R_{nBT} : 15% ;

$\mathbf{C_0}$: .....capacité linéique homopolaire des câbles enterrés : 0,2 µF/km ;
$\mathbf{Z_n}$: .....Impédance de la liaison du neutre HTA à la terre ;
$\mathbf{R_n}$: .....résistance parallèle de l'impédance de neutre ;
$\mathbf{X_n}$: .....réactance parallèle de l'impédance de neutre ;

$\mathbf{I_{xy}}$: .....courant du départ x, phase y ;
$\mathbf{I_{rx}}$: .....courant résiduel du départ x ;
$\mathbf{I_d}$: .....courant au point de défaut ;
$\mathbf{I_a}$: .....composante active du courant de défaut.
$\mathbf{I_n}$: .....courant dans l'impédance de neutre ;
$\mathbf{I_L}$: .....courant de compensation de l'impédance de compensation ;
$\mathbf{I_{des}}$: .....courant de désaccord ;

V_n : .....tension aux bornes de l'impédance de neutre ;
V_{nBT} : .....tension aux bornes de la résistance R_{nBT} du neutre BT ;

P_r : .....puissance active mesurée par une PWH ;
Q_r : .....puissance réactive mesurée par une PWH ;
P_n : .....puissance active dans l'impédance de neutre ;
Q_n : .....puissance réactive dans l'impédance de neutre ;

R_{sx} : .....résistance du modèle série de la bobine B_x ;
X_{sx} : .....réactance du modèle série de la bobine B_x ;
R_{px} : .....résistance du modèle parallèle de la bobine B_x ;
X_{px} : .....réactance du modèle parallèle de la bobine B_x ;

m_v : .....masse volumique du cuivre = 8920 kg/m^3 ;
ρ :.....résistivité du cuivre à 20°C = $1,7.10^{-8}$ Ωm ;
c : .....chaleur massique du cuivre = 380 $J.kg^{-1}K^{-1}$;
α : .....coefficient de température du cuivre = 0,004 $°C^{-1}$;

ω : .....pulsation du réseau ;
Ψ : .....angle de retard correspondant à l'instant du défaut.

PARTIE A : NEUTRE A LA TERRE PAR RESISTANCE

Le schéma étudié est celui présenté en annexe 1.

Dans cette partie le neutre du transformateur 63 kV / 20 kV est mis à la terre par une résistance. L'ensemble résistance plus prise de terre vaut : **R_{nHT} = 30 Ω.**
La résistance de la prise de terre des masses du poste HT/BT **vaut R_m = 50 Ω.**
La résistance de la prise de terre du neutre du transformateur HT/BT vaut **R_{nBT} = 15 Ω.**
La résistance de la prise de terre du client basse tension **vaut R_u = 60 Ω.**

Deux types de défaut sont étudiés :
- Type A : défaut franc phase 1 – terre
- Type B : défaut franc phase 1 – masse du poste HT/BT

Pour tous les calculs, la grandeur de référence sera la tension simple de la phase1 au secondaire du transformateur 63 kV / 20 kV **(E1 = E)**

A1 Cas d'un réseau aérien :

Les impédances des lignes et les capacités homopolaires phase - terre sont négligées.

QA 1. Donner les limites de tension des domaines BTA, BTB, HTA et HTB.

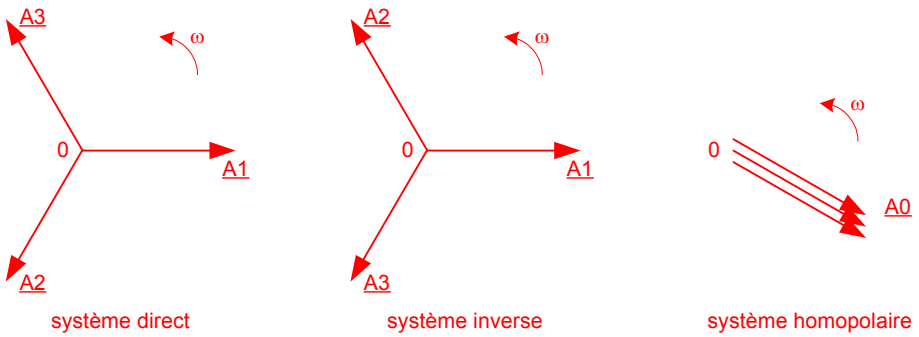
50 V < BTA ≤ 500 V
500 V < BTB ≤ 1 kV
1 kV < HTA ≤ 50 kV
50 kV < HTB

QA 2. Un système triphasé quelconque, peut se décomposer en trois systèmes indépendants (direct, inverse et homopolaire). Donner la définition de ces trois systèmes et l'illustrer par un diagramme.

Système direct :
Système triphasé équilibré de grandeurs électriques tournant dans le sens trigonométrique à la pulsation ω = 2πf dans l'ordre de succession 1, 2, 3.

Système inverse :
Système triphasé équilibré de grandeurs électriques tournant dans le sens trigonométrique à la pulsation ω = 2πf dans l'ordre de succession 1, 3, 2.

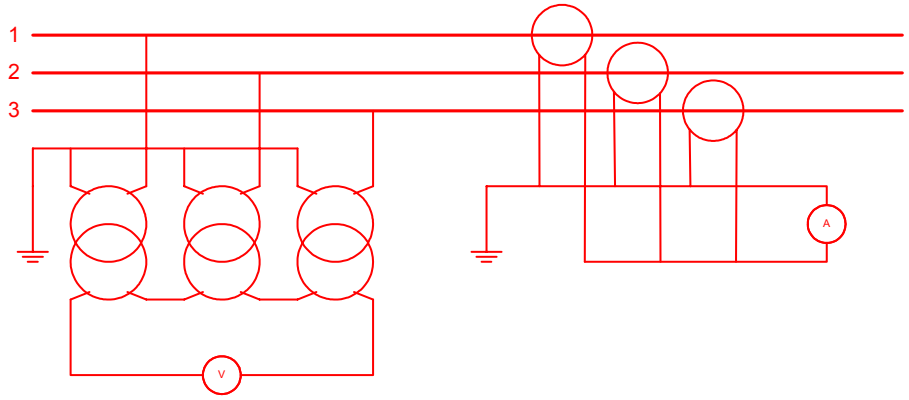
Système homopolaire :
Système de trois grandeurs identiques en module et phase tournant dans le sens trigonométrique à la pulsation ω = 2πf.



QA 3. Comment se traduit physiquement la présence d'un système homopolaire de tension et de courant dans un système triphasé.

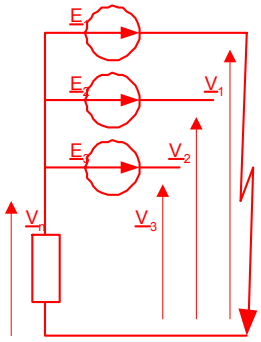
La présence d'un système homopolaire de tension se traduit par une tension entre le point neutre d'un circuit et le point neutre du générateur.
La présence d'un système homopolaire de courant se traduit par la circulation d'un courant dans le fil reliant le point neutre d'un circuit au point neutre du générateur.

QA 4. Les protections homopolaires nécessitent la connaissance des grandeurs résiduelles v_r (t) et i_r (t) pour fonctionner. Représenter un schéma, composé de transformateurs de potentiel et d'intensité, permettant d'obtenir ces informations, sur un réseau triphasé sans neutre.



mesure de Vr mesure de Ir

QA 5. Pour un défaut de type A sur le départ 1, exprimer $\underline{V}_r$ en fonction de E.



$\underline{V}_1 = 0$ $\underline{V}_n = -\underline{E}_1$ $\underline{V}_2 = \underline{E}_2 + \underline{V}_n$ $\underline{V}_3 = \underline{E}_3 + \underline{V}_n$

$\underline{V}_r = \underline{V}_1 + \underline{V}_2 + \underline{V}_3 = 0 + \underline{E}_2 + \underline{E}_3 + 2\underline{V}_n$

$\underline{V}_r = \underline{E}_2 + \underline{E}_3 - 2\,\underline{E}_1$

$\underline{V}_r = E(a^2 + a - 2) = E(a^2 + a + 1 - 3) = -3\,E$ $\underline{V}_r = -3E$

QA 6. Calculer dans ce cas V_r et I_r.

$$V_r = 3\frac{20 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 34.6\text{kV}$$

$$I_1 = \frac{E1}{R_{nHT}} = \frac{20 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 30} = 385\text{A}$$

I2 = 0 A

I3 = 0 A

$I_r = I_1 = 385$ A

QA 7. Ce défaut a-t-il une incidence sur l'alimentation du client basse tension. Pourquoi ?

Ce défaut n'a aucune incidence sur l'alimentation du client basse tension car le primaire du transformateur HT/BT ne possède pas de neutre. Le système de tensions composées coté HT reste un système triphasé équilibré direct, le système de tensions coté secondaire est donc un système triphasé direct de tensions par rapport au neutre basse tension.

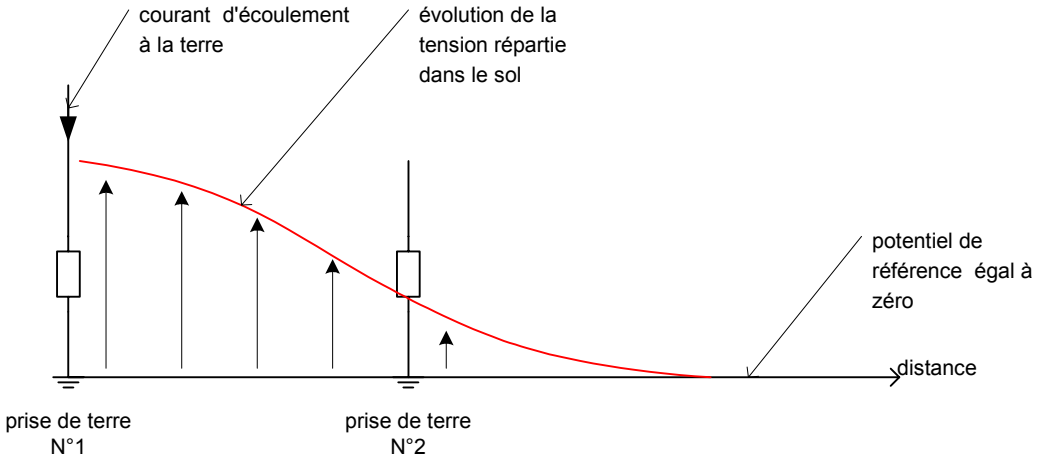
QA 8. Lors d'un défaut sur une ligne, préciser les raisons, qui conduisent au maintien ou à la séparation de cette ligne du réseau.

Bien que ce défaut ne crée pas de perturbation pour le client basse tension, une coupure est malgré tout nécessaire car :

- Le surplus de puissance à fournir par une phase du transformateur est de : $E_1.I_1$ = 4,4MVA.
- La tension répartie au niveau du sol à l'endroit du défaut et de la prise de terre peut être importante.
- Le courant à l'endroit du défaut peut être dommageable pour le câble.

Cependant le problème est avant tout la tenue thermique du matériel. La coupure peut donc être retardée selon des courbes de déclenchement normalisé.

Le couplage des terres par impédance commune représente le rapport des tensions apparaissant sur deux prises de terre proches.



La norme C15-100 précise que la tension d'isolement des matériels basse tension doit être supérieure à 1500 V.

QA 9. Pour un défaut de type B sur le départ 1, calculer l'élévation du potentiel du neutre V_{nBT} du client BT par rapport à la terre.

$$Id = \frac{E1}{R_m + R_{nHT}} = \frac{20 \cdot 10^3}{\sqrt{3}(50+30)} = 144,3A$$

$$V_{nBT} = k \cdot R_m \cdot I_d = 1082V$$

QA 10. Donner la définition de la tension d'isolement d'un matériel et préciser si dans le cas présent, la norme est respectée.

La tension d'isolation représente la valeur efficace maximum que peut supporter un appareil entre un conducteur actif et sa carcasse.
La carcasse est reliée à la terre via la résistance R_u. La tension d'un fil de phase par rapport à la terre atteint la tension V_{nBT} + 230 soit 1312 V. Cette tension est acceptable.

A2 Cas d'un réseau souterrain :

La valeur linéique des capacités homopolaires est de 0,2 µF/km, les impédances des lignes sont négligées.
Les départs sont protégés par des protections ampèremétriques homopolaires (PAH).

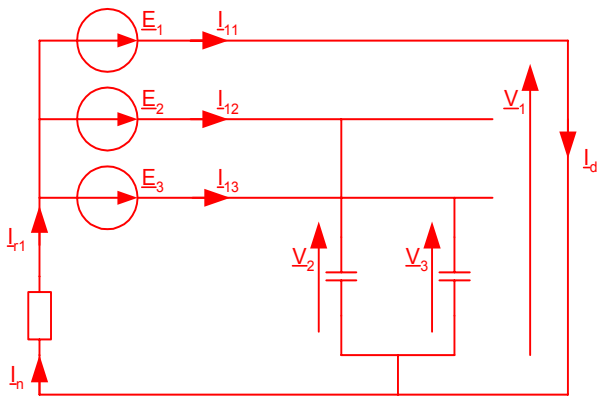
A2.1 Le départ 1 est seul en service :

- **Pour un défaut de type A :**

QA 11. Représenter sur le document réponse DRQA11 le parcours des courants engendrés par le défaut.

Voir document réponse DRQA11

QA 12. Représenter un schéma électrique équivalent au circuit en défaut et noter les tensions $\underline{E}_1$, $\underline{E}_2$, $\underline{E}_3$, $\underline{V}_1$, $\underline{V}_2$, $\underline{V}_3$ ainsi que les courants $\underline{I}_{11}$, $\underline{I}_{12}$, $\underline{I}_{13}$, $\underline{I}_n$, $\underline{I}_d$ et $\underline{I}_{r1}$.



QA 13. Calculer les modules et phases des courants $\underline{I}_{11}$, $\underline{I}_{12}$, $\underline{I}_{13}$ dans chaque phase au niveau du départ1.

$$\underline{V}_n = -\underline{E}_1$$
$$\underline{V}_1 = 0$$
$$\underline{V}_2 = \underline{E}_2 + \underline{V}_n = \underline{E}_2 - \underline{E}_1 = E(a^2 - 1)$$
$$\underline{V}_3 = \underline{E}_3 + \underline{V}_n = \underline{E}_3 - \underline{E}_1 = E(a - 1)$$
$$\underline{I}_{12} = \underline{V}_2 \cdot jC_1\omega$$
$$\underline{I}_{13} = \underline{V}_3 \cdot jC_1\omega$$
$$\underline{I}_n = \frac{\underline{E}_1}{R_{nHT}}$$
$$\underline{I}_{11} = \underline{I}_n - \underline{I}_{12} - \underline{I}_{13}$$
$$\underline{I}_{12} = jC_1\omega E(a^2 - 1) = C_1\omega E \cdot j(-\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}j - 1) = C_1\omega E(\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{3}{2}j) = C_1\omega E\sqrt{3}e^{-j\frac{\pi}{3}} \rightarrow \underline{I}_{12} = 44e^{-j\frac{\pi}{3}}$$
$$\underline{I}_{13} = jC_1\omega E(a - 1) = C_1\omega E \cdot j(-\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}j - 1) = C_1\omega E(-\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{3}{2}j) = C_1\omega E\sqrt{3}e^{-j\frac{2\pi}{3}} \rightarrow \underline{I}_{13} = 44e^{-j\frac{2\pi}{3}}$$
$$\underline{I}_n = 385A$$
$$\underline{I}_{11} = 385 - C_1\omega E(-3j) = 385 + 76,2j \rightarrow \underline{I}_{11} = 392,5e^{0,195j}$$

QA 14. Calculer le courant résiduel I_{r1} vu par la protection ampèremétrique homopolaire (PAH) du départ1 ainsi que le courant I_d circulant dans le défaut.

Le courant résiduel I_{r1} correspond au courant circulant dans la résistance de neutre R_{nHT}.
I_{r1} = 385 A
Le courant circulant dans le défaut correspond au courant I_{11}.
I_d = 392,5 A

QA 15. Représenter sur le document réponse DRQA15, le diagramme de Fresnel des tensions $\underline{E}_1$ (référence), $\underline{E}_2$, $\underline{E}_3$, $\underline{V}_1$, $\underline{V}_2$, $\underline{V}_3$ ainsi que les courants $\underline{I}_{11}$, $\underline{I}_{12}$, $\underline{I}_{13}$ et $\underline{I}_n$.

Voir document réponse DRQA15

QA 16. Les raisons évoquées à la question QA8. sur le maintien de la connexion de la ligne au réseau sont elles modifiées ? Est il nécessaire de modifier le seuil de déclenchement de la PAH du départ 1 ?

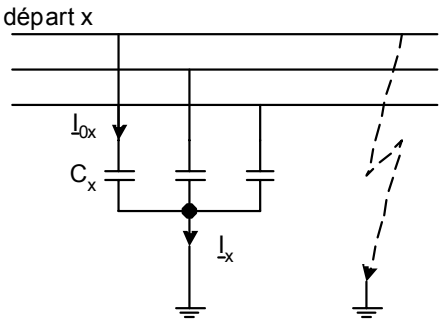
L'enfouissement du départ 1 ne modifie pas les contraintes de déclenchement.

- Le surplus de puissance pour la phase 1 du transformateur passe de 4,4 MVA à 4,5 MVA.
- La tension de défaut est inchangée.
- Le courant de défaut passe de 385 A à 392 A.

Le courant résiduel vu par la PAH du départ 1 est inchangé et vaut 385 A. Pas de modification des réglages.

A2.2 Tous les départs sont en service :

On note $\underline{I}_{0x}$ le courant circulant dans un condensateur homopolaire **en l'absence de défaut** et $\underline{I}_x$ le courant du point neutre des 3 capacités C_x du modèle, **en présence d'un défaut franc phase - terre**.



- **Pour un défaut de type A sur le départ 1 :**

QA 17. Représenter sur le document réponse DRQA17 le parcours des courants engendrés par le défaut.

Voir document réponse DRQA17

QA 18. Déterminer, la relation entre le courant $\underline{I}_x$ et le courant $\underline{I}_{0x}$.

Pour la phase 1 en l'absence de défaut, $\underline{I}_{0x} = \underline{E}_1 \cdot jC_x\omega$

Pour la phase 1 en défaut,

$$\underline{I}_x = \underline{U}_{21} \cdot jC_x\omega + \underline{U}_{31} \cdot jC_x\omega$$

$$\underline{I}_x = (\underline{E}_2 + \underline{E}_3 - 2\underline{E}_1)jC_x\omega$$

$$\underline{I}_x = -3\underline{E}_1 jC_x\omega$$

$$\underline{I}_x = -3\underline{I}_{0x}$$

QA 19. Proposer une intensité pour le réglage du seuil de déclenchement de la PAH du départ 2.

La protection ampèremétrique homopolaire du départ 2 doit être réglée à un seuil supérieur à $3I_{02}$.

$$I_{02} = EC_2\omega = \frac{20 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \cdot 45 \cdot 0,2 \cdot 10^{-6} \cdot 100\pi = 32,65A$$

Réglage du seuil de la PAH2 > 100A

QA 20. Calculer le nouveau courant résiduel I_{r1} du départ 1 et la valeur du courant de défaut I_d.

A partir du document DRAQA17

$$\underline{I}_{r1} = \underline{I}_n - \underline{I}_2 - \underline{I}_3$$

$$\underline{I}_n = \frac{-\underline{V}_n}{R_{nHT}} = \frac{\underline{E}_1}{R_{nHT}}$$

$$\underline{I}_2 = -3jC_2\omega\underline{E}_1$$

$$\underline{I}_3 = -3jC_3\omega\underline{E}_1$$

$$\underline{I}_{r1} = \underline{E}_1\left(\frac{1}{R_{nHT}} + 3j(C_2 + C_3)\omega\right)$$

$$\underline{I}_d = \underline{I}_{r1} - \underline{I}_1 = \underline{E}_1\left(\frac{1}{R_{nHT}} + 3j(C_1 + C_2 + C_3)\omega\right)$$

$$\underline{I}_{r1} = 385 + 174j = 422,5e^{j24,3°}$$

$$\underline{I}_d = 385 + 500,6j = 631e^{j52,4°}$$

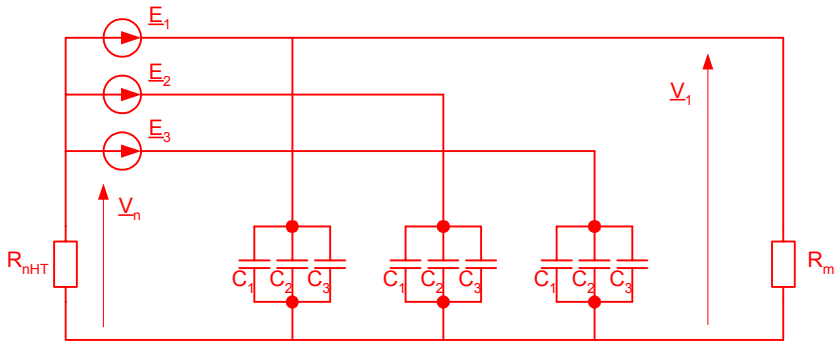
QA 21. Proposer une intensité pour le réglage du seuil de déclenchement de la PAH du départ 1.

Il faut placer le réglage de la PAH à une valeur supérieure à 3 I_{01} et inférieure à I_{r1}. Il est préférable de se placer juste au dessus de la limite basse afin de détecter les défauts résistants.

$3I_{01} = 3EC_1\omega = 76A$ et I_{r1} = 422,5A. Il faut régler la PAH à 80A.

- **Pour un défaut de type B sur le départ 1 :**

QA 22. Représenter un schéma simplifié de l'installation pendant le défaut en ne faisant apparaître que le générateur et les impédances concernées.



QA 23. Exprimer la tension $\underline{V}_n$ aux bornes de la résistance R_{nHT} en fonction des éléments du circuit.

$$C_e = C_1 + C_2 + C_3$$

$$\frac{1}{\underline{Z}_1} = \frac{1}{R_m} + jC_e\omega$$

$$\frac{1}{\underline{Z}_2} = \frac{1}{\underline{Z}_3} = jC_e\omega$$

En utilisant le théorème de Millman on obtient :

$$-\underline{V}_n = \frac{\frac{\underline{E}_1}{\underline{Z}_1} + \frac{\underline{E}_2}{\underline{Z}_2} + \frac{\underline{E}_3}{\underline{Z}_3}}{\frac{1}{\underline{Z}_1} + \frac{1}{\underline{Z}_2} + \frac{1}{\underline{Z}_3} + \frac{1}{R_{nHT}}} = \frac{E\left(\frac{1}{R_m} + jC_e\omega + a^2jC_e\omega + ajC_e\omega\right)}{\frac{1}{R_m} + \frac{1}{R_{nHT}} + 3jC_e\omega} = \frac{E}{1 + \frac{R_m}{R_{nHT}} + 3jR_mC_e\omega}$$

QA 24. Calculer la valeur efficace I_d du courant de défaut.

$$\underline{I}_d = \frac{\underline{V}_1}{R_m} = \frac{\underline{E}_1 + \underline{V}_n}{R_m} = \frac{E}{R_m}\left(1 - \frac{1}{1 + \frac{R_m}{R_{nHT}} + 3jR_mC_e\omega}\right) = E\frac{\frac{1}{R_{nHT}} + 3jC_e\omega}{1 + \frac{R_m}{R_{nHT}} + 3jR_mC_e\omega}$$

$$\underline{I}_d = 178,8 + 42,4j = 183,8e^{j13,3°}$$

QA 25. Calculer l'élévation du potentiel V_{nBT} du neutre BT par rapport à la terre.

$$V_{nBT} = k \cdot R_m \cdot I_d = 1378V$$

QA 26. Le défaut précédent présente-t-il un risque pour le matériel BT.

La tension entre phase et masse d'un appareil basse tension atteint : 1378 +230 = 1608V
Cette tension est supérieure à 1500V, il y a risque de claquage de l'isolation dans les appareils basse tension.

QA 27. Citer 3 problèmes qui sont apparus sur le réseau HTA suite à l'enfouissement des lignes.

Les principaux problèmes liés à l'enfouissement des lignes sont :

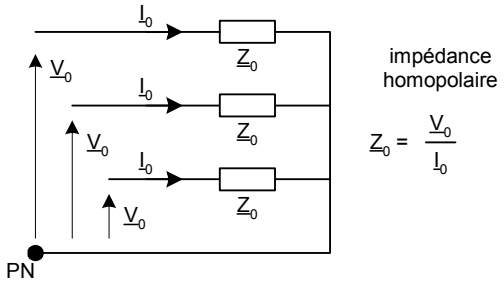
- Détection plus difficile des défauts à la terre car le seuil des PAH doit être augmenté au dessus de 3 I_{0x}.
- Augmentation importante du courant de défaut (passage de 385 A à 631 A dans notre cas). L'extinction devient plus difficile, les défauts deviennent permanents.
- Augmentation du potentiel du neutre basse tension par rapport à la terre. Risque de claquage des matériels chez les clients basse tension.

PARTIE B : NEUTRE COMPENSE

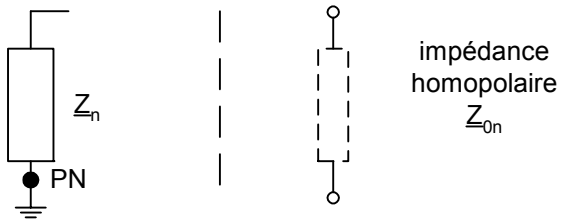
Le neutre compensé permet de réduire les courants de défauts, les énergies mises en jeu, les surtensions BT et rend un certains nombre de défauts auto extincteurs.
La résistance du neutre HTA est alors remplacée par une impédance Z_n composée d'une résistance Rn en parallèle avec une réactance X_n.

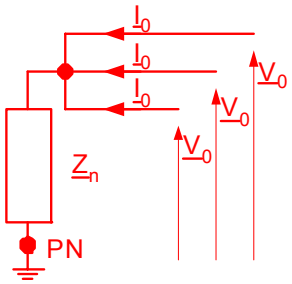
B1. Détermination des éléments du schéma homopolaire :

L'impédance homopolaire d'un circuit est déterminée en plaçant sur chaque phase la même tension par rapport à un point neutre considéré.



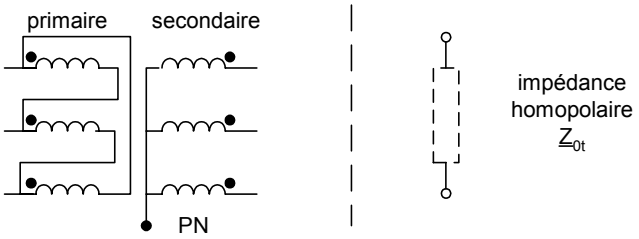
QB 1. Déterminer en fonction de $\underline{Z}_n$, l'impédance homopolaire $\underline{Z}_{0n}$ correspondant au circuit de mise à la terre du transformateur 63 kV / 20 kV.

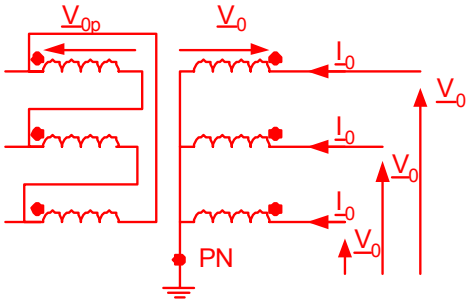




$$\underline{V}_0 = 3\underline{Z}_n\underline{I}_0 \rightarrow \underline{Z}_{0n} = \frac{\underline{V}_0}{\underline{I}_0} = 3\underline{Z}_n$$

QB 2. Déterminer l'impédance homopolaire $\underline{Z}_{0t}$ du transformateur 63 kV / 20 kV vue du secondaire. Le courant magnétisant, les résistances et réactances de fuites des enroulements sont négligées.

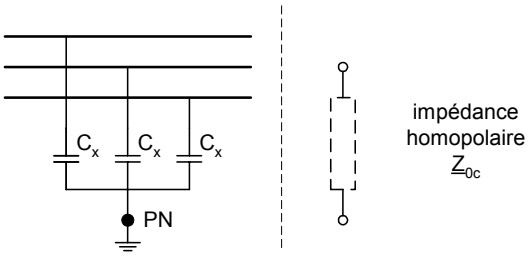




Le couplage triangle au primaire impose $3\underline{V}_{0p} = 0$ donc $\underline{V}_0 = m\underline{V}_{0p} = 0$ quelque soit $\underline{I}_0 \rightarrow \underline{Z}_{0T} = 0$

QB 3. Déterminer l'impédance homopolaire $\underline{Z}_{0c}$ d'un câble

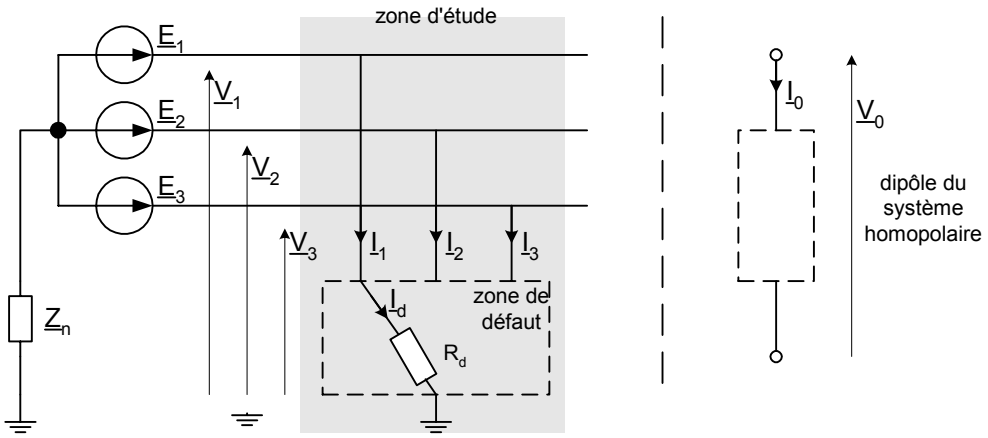
Cx représente la capacité phase - terre d'un conducteur. Le câble est symétrique et les 3 capacités sont identiques.



$$\underline{Z}_{0c} = \frac{1}{jC_x\omega}$$

B2. Détermination du dipôle homopolaire au point de défaut :

Le défaut considéré est un défaut phase1 – terre de résistance R_d



QB 4. Exprimer le courant homopolaire $\underline{I}_0$ en fonction du courant de défaut $\underline{I}_d$.

$$\left.\begin{array}{l}\underline{I}_1 = \underline{I}_d \\ \underline{I}_2 = 0 \\ \underline{I}_3 = 0\end{array}\right\} \underline{I}_0 = \frac{1}{3}\left(\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3\right) = \frac{\underline{I}_d}{3}$$

QB 5. Exprimer la tension homopolaire $\underline{V}_0$ du système de tensions $\underline{V}_1$, $\underline{V}_2$, $\underline{V}_3$ en fonction de $\underline{E}_1$, $\underline{E}_2$, $\underline{E}_3$, $\underline{I}_0$ et Rd.

$$\begin{cases}\underline{V}_1 = R_d\underline{I}_d \\ \underline{V}_2 = \underline{E}_2 - \underline{E}_1 + R_d\underline{I}_d \\ \underline{V}_3 = \underline{E}_3 - \underline{E}_1 + R_d\underline{I}_d\end{cases}$$

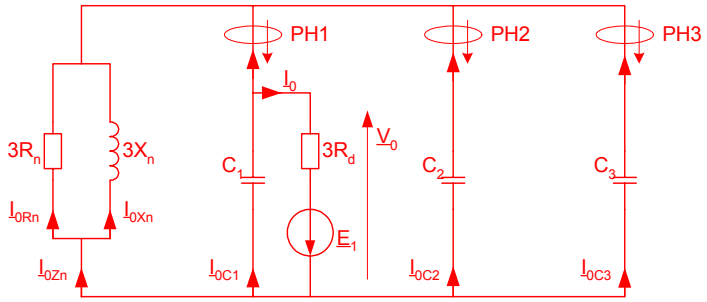
$$\underline{V}_0 = \frac{1}{3}\left(\underline{V}_1 + \underline{V}_2 + \underline{V}_3\right) = R_d\underline{I}_d + \frac{1}{3}\left(\underline{E}_2 + \underline{E}_3 - 2\underline{E}_1\right) = R_d\underline{I}_d - \underline{E}_1$$

$$\underline{V}_0 = 3R_d\underline{I}_0 - \underline{E}_1$$

B3. Représentation du schéma homopolaire :

QB 6. Représenter le schéma équivalent homopolaire de l'installation en défaut et flécher les courants et tensions dans le sens conventionnel des générateurs et des récepteurs.

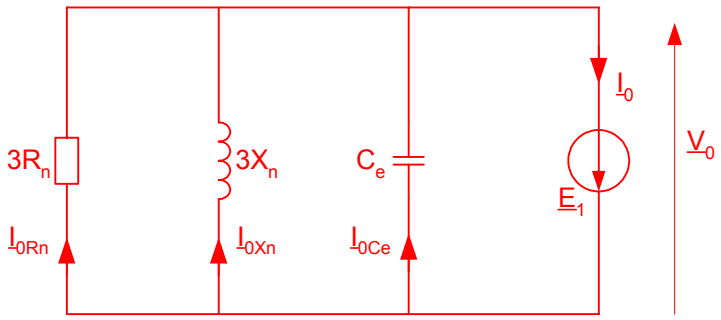
QB 7. Représenter sur ce schéma la position des protections homopolaires des départs 1, 2 et 3.



B4. Utilisation de Protection Ampère métrique Homopolaire (P.A.H.) :

QB 8. Lors d'un défaut franc, le courant de défaut est limité à 40 A efficace avec une composante active de 20 A. Déterminer les intervalles des valeurs possibles pour R_n et X_n.

Pour un défaut franc, $R_d = 0$
Schéma homopolaire équivalent :



$$\underline{I}_d = 3\underline{I}_0$$

$$\underline{I}_{0actif} = \underline{I}_{0Rn} = \frac{\underline{E}_1}{3R_n} \rightarrow \underline{I}_{dactif} = \frac{\underline{E}_1}{R_n}$$

$$R_n = \frac{\underline{E}_1}{\underline{I}_{dactif}} = \frac{20 \cdot 10^3}{20 \cdot \sqrt{3}} = 577\Omega$$

$$\underline{I}_{0réactif} = \underline{I}_{0Xn} + \underline{I}_{0Ce} = \frac{\underline{E}_1}{3jX_n} + \underline{E}_1 \cdot jC_e\omega = j\underline{E}_1\left(C_e\omega - \frac{1}{3X_n}\right)$$

$$\underline{I}_{dréactif_{max}} = 3\underline{I}_{0réactif_{max}} = \sqrt{I_d^2 - I_{dactif}^2} = \sqrt{40^2 - 20^2} = 34,64A$$

$$I_{0réactif} = \left|E_1\left(C_e\omega - \frac{1}{3X_n}\right)\right| < \frac{\underline{I}_{dréactif_{max}}}{3} = 11,55A$$

$$\begin{cases} C_e\omega - \dfrac{1}{3X_n} < \dfrac{11,55}{E} \rightarrow \dfrac{1}{3X_n} > C_e\omega - \dfrac{11,55}{E} \\ -C_e\omega + \dfrac{1}{3X_n} < \dfrac{11,55}{E} \rightarrow \dfrac{1}{3X_n} < C_e\omega + \dfrac{11,55}{E} \end{cases}$$

$$\frac{1}{C_e\omega + \dfrac{11,55}{E}} < 3X_n < \frac{1}{C_e\omega - \dfrac{11,55}{E}} \rightarrow 21,6\Omega < X_n < 24,8\Omega$$

QB 9. Pour un réseau accordé et un défaut de résistance R_d, exprimer en fonction de R_d et des éléments du schéma homopolaire, la tension homopolaire $\underline{V}_0$, les courants résiduels $\underline{I}_{r1}$, $\underline{I}_{r2}$, $\underline{I}_{r3}$ des départs 1, 2, 3 et le courant $\underline{I}_{zn}$ dans l'impédance du neutre.

Pour un réseau accordé, $-\underline{V}_0 = \underline{E}_1 \dfrac{3R_n}{3R_n + 3R_d} \rightarrow \underline{V}_0 = -E \dfrac{R_n}{R_n + R_d}$

$$\underline{I}_0 = \frac{\underline{E}_1}{3(R_d + R_n)} \quad , \quad \underline{I}_{0C1} = -\underline{V}_0 \cdot jC_1\omega \quad , \quad \underline{I}_{0C2} = -\underline{V}_0 \cdot jC_2\omega \quad , \quad \underline{I}_{0C3} = -\underline{V}_0 \cdot jC_3\omega \quad , \quad \underline{I}_{0Zn} = \frac{-\underline{V}_0}{3\underline{Z}_n}$$

$$\underline{I}_{r1} = 3(\underline{I}_{0C1} - \underline{I}_0) = \frac{\underline{E}_1}{R_d + R_n}(-1 + 3jR_nC_1\omega)$$

$$\underline{I}_{r2} = 3\underline{I}_{0C2} = \frac{3jR_nC_2\omega}{R_d + R_n}\underline{E}_1$$

$$\underline{I}_{r3} = 3\underline{I}_{0C3} = \frac{3jR_nC_3\omega}{R_d + R_n}\underline{E}_1$$

$$\underline{I}_{Zn} = 3\underline{I}_{0Zn} = \underline{E}_1 \frac{R_n}{R_d + R_n} \cdot \frac{1}{\dfrac{jR_nX_n}{R_n + jX_n}} = \underline{E}_1 \frac{R_n + jX_n}{j(R_d + R_n)X_n}$$

QB 10. Pour R_d = 100 Ω, calculer et représenter un diagramme de Fresnel $\underline{V}_0$, I_{r1}, $\underline{I}_{r2}$, $\underline{I}_{r3}$, $\underline{I}_n$ en prenant $\underline{E}_1$ comme référence.

Application numérique :

Réseau accordé : $X_n = \dfrac{1}{C_e\omega} = 23{,}07\Omega$

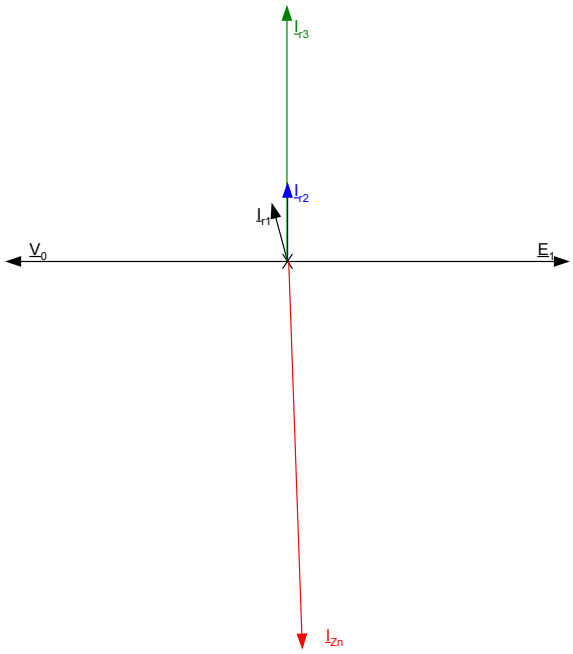
$$\underline{V}_0 = -9841$$

$$\underline{I}_{r1} = -17 + 65j = 67{,}13e^{j105°}$$

$$\underline{I}_{r2} = 83{,}5j = 83{,}5e^{j90°}$$

$$\underline{I}_{r3} = 278{,}2j = 278{,}2e^{j90°}$$

$$\underline{I}_{Zn} = 17 - 426{,}7j = 427e^{-j88°}$$

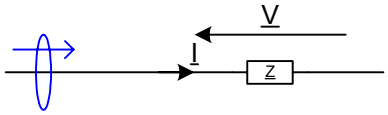


QB 11. Pour quelles raisons, les PAH ne permettent pas la protection des réseaux à neutre compensé ?

Les PAH ne sont pas adaptées car lors d'un défaut tous les départs ont un courant résiduel important. La différence entre le courant résiduel d'un départ sain et d'un départ en défaut n'est pas significative pour être détectée.

B5. Utilisation de Protection Watt métrique Homopolaire type 1(PWH1) :

Les protections watt métriques homopolaires, mesurent la puissance active et réactive à partir des grandeurs résiduelles $\underline{V}_r$ et $\underline{I}_r$. La puissance active est considérée comme positive en convention récepteur lorsqu'elle circule dans le sens de la flèche notée sur le document annexe 1.



Les protections de type 1 ne fonctionnent que sur un régime permanent de défaut.

QB 12. En respectant cette convention, exprimer puis calculer les puissances actives et réactives vues par les PWH des départs 1 et 2 (P_{r1}, P_{r2}, Q_{r1}, Q_{r2}).

$$\underline{V}_r = 3\underline{V}_0$$

$$\underline{S}_{r1} = \underline{V}_r(-\underline{I}_{r1}^*) = \frac{-3R_n}{R_d+R_n}E\left(\frac{E}{R_d+R_n} + 3j\frac{R_n}{R_d+R_n}C_1\omega E\right) = \frac{-3R_nE^2}{(R_d+R_n)^2} - 9j\frac{R_n^2}{(R_d+R_n)^2}C_1\omega E^2$$

$$P_{r1} = \frac{-3R_nE^2}{(R_d+R_n)^2} \qquad Q_{r1} = -9\frac{R_n^2}{(R_d+R_n)^2}C_1\omega E^2$$

$$\underline{S}_{r2} = \underline{V}_r(-\underline{I}_{r2}^*) = \frac{-3R_n}{R_d+R_n}E\left(3j\frac{R_n}{R_d+R_n}C_2\omega E\right) = -9j\frac{R_n^2}{(R_d+R_n)^2}C_2\omega E^2$$

$$P_{r2} = 0 \qquad Q_{r2} = -9\frac{R_n^2}{(R_d+R_n)^2}C_2\omega E^2$$

Application numérique :

$P_{r1} = -504\text{kW}$ $\qquad Q_{r1} = -1{,}92\text{MVar}$

$P_{r2} = 0$ $\qquad Q_{r2} = -2{,}47\text{MVar}$

QB 13. Exprimer et calculer les puissances actives et réactives dans l'impédance de neutre (P_n, Q_n).

$$\underline{S}_n = -\underline{V}_0\underline{I}_{Zn}^* = \frac{-R_n}{R_d+R_n}E^2\left(\frac{-X_n}{(R_d+R_n)X_n} - j\frac{R_n}{(R_d+R_n)X_n}\right) = \frac{R_nE^2}{(R_d+R_n)^2} + j\frac{R_n^2E^2}{(R_d+R_n)^2X_n}$$

$$P_n = \frac{R_nE^2}{(R_d+R_n)^2} \qquad Q_n = \frac{R_n^2E^2}{(R_d+R_n)^2X_n}$$

Application numérique :

$P_n = 168\text{kW}$ $\qquad Q_n = 4{,}2\text{MVar}$

La chaîne de mesure des PWH est constituée de transformateurs de potentiel de rapport 100 / 20000 de classe 1,5 et de transformateurs de courant de rapport 5 / 200 de classe 2.

QB 14. Proposer un réglage du seuil S_w pour la PWH1 du départ 1 (voir annexe 2).

La détection de défaut par la puissance active homopolaire nécessite que la tension homopolaire $v_0(t)$ soit stable. Le régime transitoire d'établissement de $v_0(t)$ ne doit pas créer le déclenchement intempestif des PWH.

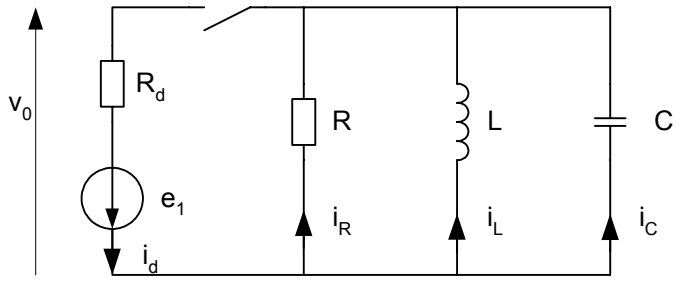
L'erreur sur un transformateur de potentiel est de : $\frac{1,5}{100} \cdot 20 \cdot 10^3 = 300V$

L'erreur sur un transformateur d'intensité est de : $\frac{2}{100} \cdot 200 = 4A$

La chaîne de mesure utilise 3 transformateurs de potentiel en série et 3 transformateurs d'intensité en parallèle.
L'erreur maximum sur P_r est de 900 x 12 = 10,8 kW.
Le seuil Sw sera réglé à 12 kW.

B6. Étude du régime transitoire à l'apparition d'un défaut de résistance Rd sur un réseau parfaitement compensé :

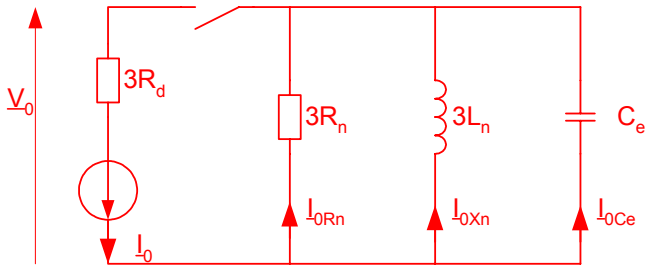
Le schéma étudié est le suivant :



$R_d = 100\Omega$
$R = 577\Omega$
$L = 73,4mH$
$C = 138\mu F$

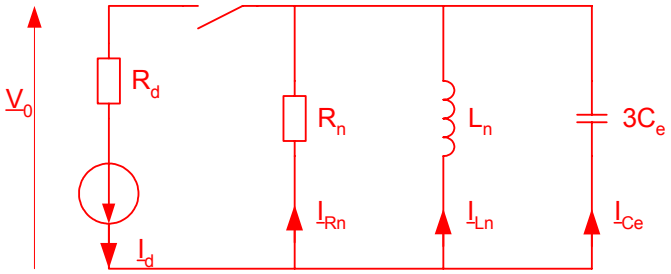
Le défaut se produit à l'instant t_0 correspondant à l'angle Ψ ($\Psi = \omega t_0$). La tension de référence reste la tension $e_1(t) = E_1\sqrt{2}\sin(\omega t)$

QB 15. En regard de la question QB6., identifier les composants R, L, C et préciser les transformations appliquées à ce schéma.



Toutes les impédances sont divisées par trois afin de faire apparaître les grandeurs mesurables :

$R = R_n$
$L = L_n$
$C = 3C_e$



QB 16. Établir l'équation différentielle du courant i_L (t) apparaissant dans l'inductance L à l'apparition du défaut.

$$\begin{cases} i_d = i_R + i_L + i_C \\ v_0 = R_d i_d - e_1 \\ i_c = -C\dfrac{dv_0}{dt} \\ i_R = \dfrac{-v_0}{R} \\ v_0 = -L\dfrac{di_L}{dt} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} i_d = LC\dfrac{d^2 i_L}{dt^2} + \dfrac{L}{R}\dfrac{di_L}{dt} + i_L \\ i_d = \dfrac{v_0 + e_1}{R_d} = \dfrac{-L}{R_d}\dfrac{di_L}{dt} + \dfrac{e_1}{R_d} \end{cases}$$

$$\frac{d^2 i_L}{dt^2} + \frac{1}{C}\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_d}\right)\frac{di_L}{dt} + \frac{i_L}{LC} = \frac{e_1}{R_d LC}$$

QB 17. Résoudre numériquement cette équation pour Ψ = π / 2 et écrire l'équation temporelle de i_L (t).

$R = 577\Omega$, $X_n = 23{,}06\Omega \rightarrow L = \dfrac{X_n}{\omega} = 73{,}4\text{mH}$, $R_d = 100\Omega$, $C = 3C_e = 138\mu F$

$$\frac{d^2 i_L}{dt^2} + 85\frac{di_L}{dt} + 9{,}87\cdot 10^4 i_L = 16{,}12\cdot 10^6 \sin(100\pi t + \psi)$$

Résolution de l'équation sans second membre :

$$\frac{d^2 i_L}{dt^2} + 85\frac{di_L}{dt} + 9{,}87\cdot 10^4 i_L = 0$$

$$\Delta = (\pm 622j)^2$$

solution générale : $i_{Lg} = e^{-42{,}5t}\left(K\cos(311t + \varphi_0)\right)$

solution particulière :

$$\underline{V}_0 = -\underline{E}_1\frac{R}{R + R_d} \quad , \quad \underline{I}_L = \frac{-\underline{V}_0}{jL\omega} = -j\underline{E}_1\frac{R}{(R + R_d)L\omega}$$

$$i_{Lp}(t) = E\sqrt{2}\frac{R}{(R + R_d)L\omega}\sin\left(\omega t + \psi - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$i_{Lp}(t) = 604{,}2\sin\left(\omega t + \psi - \frac{\pi}{2}\right)$$

Solution finale :

$$i_L(t) = e^{-42{,}5t}\left(K\cos(311t + \varphi_0)\right) - 604\cos(314t + \psi)$$

Recherche des constantes K et φ_0 par les conditions initiales :

à t=0 : $i_L(0)=0$ et $\dfrac{di_L(0)}{dt}=0$, $\psi=\dfrac{\pi}{2}$

$$\frac{di_L}{dt}=-42,5Ke^{-42,5t}\cos(311t-\varphi_0)-311Ke^{-42,5t}\sin(311t+\varphi_0)+604\cdot 314\sin(314t+\psi)$$

$$\begin{cases}K\cos\varphi_0-604\cos\psi=0\\-42,5K\cos\varphi_0-311K\sin\varphi_0+190\cdot 10^3\sin\psi=0\end{cases}\rightarrow\begin{cases}\cos\varphi_0=0\rightarrow\varphi_0=\dfrac{\pi}{2}\\K=610\end{cases}$$

$$i_L(t)=-e^{-42,5t}610\sin(311t)+604\sin(314t)$$

QB 18. Montrer que i_L (t) peut s'écrire sous forme approchée $i_L(t)=\hat{I}(1-e^{-\alpha t})\sin\omega t$, exprimer Î et α en fonction des éléments du circuit.

$$i_L(t)\approx 604\left(1-e^{-42,5t}\right)\sin 314t$$

$$i_L(t)=\hat{I}\left(1-e^{-\alpha t}\right)\sin\omega t \text{ avec } \hat{I}=E\sqrt{2}\frac{R}{(R+R_d)L\omega} \text{ et } \alpha=\frac{1}{2C}\left(\frac{1}{R}+\frac{1}{R_d}\right)$$

QB 19. Exprimer puis écrire numériquement la tension homopolaire v_0 (t).

$$v_0(t)=-L\frac{di_L}{dt}=-L\omega\hat{I}\left(\left(\frac{\alpha}{\omega}\sin\omega t-\cos\omega t\right)e^{-\alpha t}+\cos\omega t\right)$$

$$v_0(t)=-13930\left((0,135\sin\omega t-\cos\omega t)e^{-42,5t}+\cos\omega t\right)$$

QB 20. Exprimer puis écrire numériquement le courant de défaut i_d (t)

$$i_d(t)=\frac{v_0(t)+e_1(t)}{R_d}\ ,\ e_1(t)=E\sqrt{2}\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right)$$

$$i_d(t)=\frac{-L\omega\hat{I}}{R_d}\left(\left(\frac{\alpha}{\omega}\sin\omega t-\cos\omega t\right)e^{-\alpha t}+\left(1-\frac{E\sqrt{2}}{L\omega\hat{I}}\right)\cos\omega t\right)$$

$$i_d(t)=139,3\left((0,135\sin\omega t-\cos\omega t)e^{-42,5t}-0,17\cos\omega t\right)$$

QB 21. Exprimer puis écrire numériquement le courant résiduel i_{r2} (t) vu par la PWH du départ 2.

$$i_{C2}(t)=-3C_2\frac{dv_0(t)}{dt}\ ,\ i_{r2}(t)=-i_{C2}(t)$$

$$i_{r2}(t)=-3L_nC_2\omega\hat{I}\left((\alpha\cdot\cos\omega t+\omega\cdot\sin\omega t)e^{-\alpha t}-\alpha\left(\frac{\alpha}{\omega}\sin\omega t-\cos\omega t\right)e^{-\alpha t}-\omega\cdot\sin\omega t\right)$$

$$i_{r2}(t)=-3L_nC_2\omega^2\hat{I}\left(\left(\frac{2\alpha}{\omega}\cos\omega t+\left(1-\frac{\alpha^2}{\omega^2}\right)\sin\omega t\right)e^{-\alpha t}-\sin\omega t\right)$$

$$i_{r2}(t)=-118,1\left((0,271\cos\omega t+0,982\sin\omega t)e^{-42,5t}-\sin\omega t\right)$$

Afin de simplifier les calculs, on fera l'hypothèse que les termes exponentiels décroissent lentement devant la période du secteur, ce qui signifie qu'un terme de la forme $e^{-\alpha t}\sin\omega t$ a une valeur moyenne nulle.

QB 22. En tenant compte de cette hypothèse, exprimer l'évolution de la puissance active résiduelle mesurée par la PWH du départ 2 en fonction du temps P_{r2} (t).

$$P_{r2}(t) = 3v_0(t)i_{r2}(t)$$

$$P_{r2}(t) = 9L_n^2C_2\omega^3\hat{I}^2\left(\left(\frac{\alpha}{\omega}e^{-\alpha t}\sin\omega t - e^{-\alpha t}\cos\omega t + \cos\omega t\right)\left(\frac{2\alpha}{\omega}e^{-\alpha t}\cos\omega t + \left(1-\frac{\alpha^2}{\omega^2}\right)e^{-\alpha t}\sin\omega t - \sin\omega t\right)\right)$$

$$P_{r2}(t) = 9L_n^2C_2\omega^3\hat{I}^2\left(\begin{array}{l}\frac{2\alpha^2}{\omega^2}e^{-2\alpha t}\sin\omega t\cdot\cos\omega t + \frac{\alpha}{\omega}\left(1-\frac{\alpha^2}{\omega^2}\right)e^{-2\alpha t}\sin^2\omega t - \frac{\alpha}{\omega}e^{-\alpha t}\sin^2\omega t - \frac{2\alpha}{\omega}e^{-2\alpha t}\cos^2\omega t \\ -\left(1-\frac{\alpha^2}{\omega^2}\right)e^{-2\alpha t}\cos\omega t\cdot\sin\omega t + e^{-\alpha t}\sin\omega t\cdot\cos\omega t + \frac{2\alpha}{\omega}e^{-\alpha t}\cos^2\omega t \\ +\left(1-\frac{\alpha^2}{\omega^2}\right)e^{-\alpha t}\cos\omega t\cdot\sin\omega t - \sin\omega t\cdot\cos\omega t\end{array}\right)$$

En tenant compte de l'hypothèse, seul les termes en $\sin^2$ et en $\cos^2$ donneront une valeur moyenne non nulle sur une période.

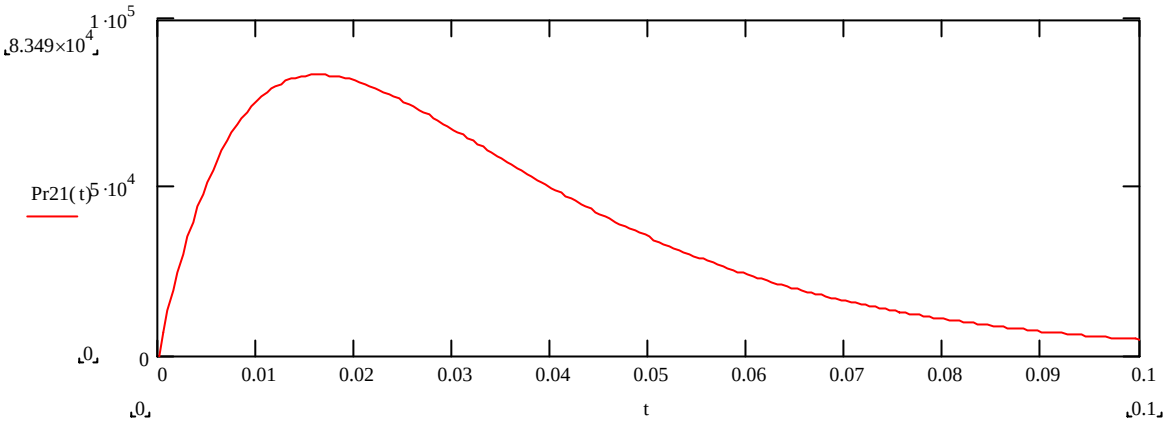
$$\tilde{P}_{r2}(t) = 9L_n^2C_2\omega^3\hat{I}^2\left(\frac{\alpha}{\omega}\left(1-\frac{\alpha^2}{\omega^2}\right)e^{-2\alpha t}\sin^2\omega t - \frac{\alpha}{\omega}e^{-\alpha t}\sin^2\omega t - \frac{2\alpha}{\omega}e^{-2\alpha t}\cos^2\omega t + \frac{2\alpha}{\omega}e^{-\alpha t}\cos^2\omega t\right)$$

$$\tilde{P}_{r2}(t) = 9L_n^2C_2\omega^2\hat{I}^2\alpha e^{-\alpha t}\left(\left(1-\frac{\alpha^2}{\omega^2}\right)e^{-\alpha t}\left(\frac{1-\cos 2\omega t}{2}\right) - \left(\frac{1-\cos 2\omega t}{2}\right) + 2\left(-2^{-\alpha t}+1\right)\left(\frac{1+\cos 2\omega t}{2}\right)\right)$$

$$\bar{P}_{r2}(t) = \frac{9}{2}L_nC_2\omega^2\hat{I}^2\alpha e^{-\alpha t}\left(1-\left(1+\frac{\alpha^2}{\omega^2}\right)e^{-\alpha t}\right)$$

$$\bar{P}_{r2}(t) = 334\cdot 10^3\left(1-e^{-42{,}5t}\right)e^{-42{,}5t}$$

QB 23. Calculer la valeur maximum de cette puissance résiduelle et représenter l'allure de P_{r2} (t).



$$\frac{d\bar{P}_{r2}(t)}{dt} = 334 \cdot 42{,}5 \cdot e^{-42{,}5t}\left(-1 + 2e^{-42{,}5t}\right)$$

$$\frac{d\bar{P}_{r2}(t)}{dt} = 0 \rightarrow t = \frac{\ln 2}{42{,}5}$$

$$\bar{P}_{r2max} = 334 \cdot 10^3 \left(1 - e^{-\ln 2}\right) e^{-\ln 2} = 83\text{kW}$$

QB 24. A quoi est due l'apparition de cette puissance active.

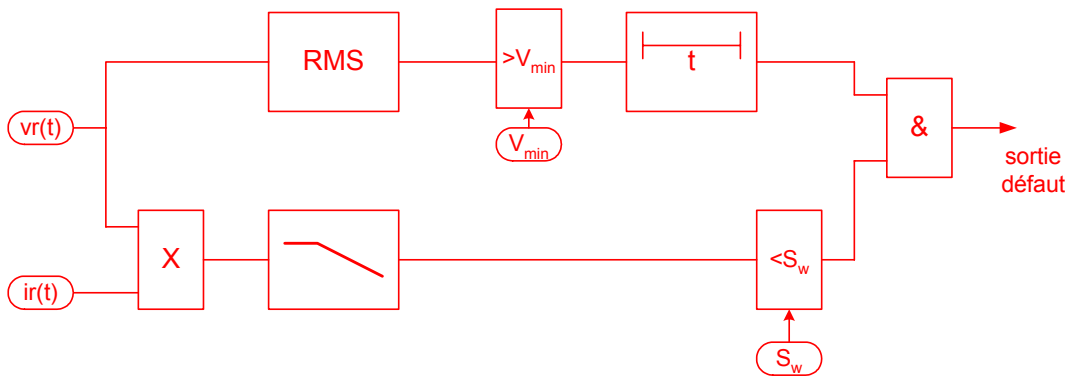
Cette puissance active résulte de l'énergie que stocke le condensateur C_2 durant le régime transitoire.

Une étude similaire à la disparition du défaut montrerait que la puissance résiduelle sur ce départ aurait la même allure mais avec un signe opposé.

QB 25. Les régimes transitoires peuvent-ils perturber le fonctionnement des PWH ? Pourquoi.

Les régimes transitoires de défaut perturbent les PWH1 car la puissance moyenne transitoire dépasse le seuil de déclenchement (ici 83 kW pour un seuil à 12 kW). Des déclenchements intempestifs risquent de se produire sur des départs sains.

QB 26. Proposer un schéma fonctionnel du module de détection d'une PWH, permettant de rejeter ces perturbations.



L'enregistrement d'un défaut est présenté sur l'annexe 5 (documents 1 et 2).

QB 27. Préciser en le justifiant, parmi les départs 1 et 2, quel est le départ en défaut.

A partir du diagramme de Fresnel de la question QB10., on remarque que le courant résiduel d'un départ sain est en avance de 90° par rapport à la tension résiduelle. Le courant d'un départ en défaut est en avance d'un angle supérieur à 90°. C'est donc le départ qui a le courant le plus en avance qui est en défaut ; soit le départ 1.

QB 28. Indiquer en le justifiant, l'instant de disparition du défaut.

Le courant résiduel du départ 1 est en phase avec celui du départ 2 à t = 186 ms alors qu'il ne l'est pas à t = 176 ms. Le défaut a donc disparu entre ces deux instants à t = 180ms environ.

Le faible courant de défaut favorise l'auto extinction des défauts. Il se produit dans certaines conditions, des défauts auto extincteurs réamorçant. Ces défauts ont une durée de quelques dizaines de millisecondes mais avec une périodicité de plusieurs centaines de millisecondes. Le régime permanent n'est jamais atteint. De nouvelles protections homopolaires dénommées PWH2 ont été élaborées pour la détection de ce type de défaut.

B7. Étude d'une PWH2 :

Les caractéristiques ainsi que le schéma fonctionnel de la détection d'une PWH2 sont présentées en annexe 2.

Les réglages sont les suivants :

- Sw : 40 kW ;
- Confirmation : sans ;
- Temps mémoire de la temporisation de maintien : 200 ms ;
- Temps de la temporisation de déclenchement : 200 ms (temporisation au travail).

Un enregistrement d'un défaut réamorçant présentant la tension v_r (t), le courant i_r (t), la puissance active P_r (t) et la puissance réactive Q_r (t) est donné sur le document réponse DRB29-30-31-32.

<u>Sur ce document réponse DRB29-30-31-32</u> :

QB 29. Représenter le chronogramme de l'information de puissance au point S à la sortie du bloc « calcul des puissances résiduelles avec contrôle ». Le contrôle consiste au calcul du rapport Q_r / P_r.

Voir document réponse

QB 30. Représenter le chronogramme de l'évolution temporelle du bit de sortie « instantané (pick up) ».

Voir document réponse

QB 31. Représenter le chronogramme de l'évolution temporelle de la grandeur « temps mémorisé » de la temporisation TMD.

Voir document réponse

QB 32. Représenter les chronogrammes des bits de sorties "drop out", "temporisé avant accrochage".

Voir document réponse

QB 33. Comment réagirait une PWH1 sur ce type de défaut.

Une protection wattmétrique de type 1 ne déclenchera jamais sur ce type de défaut car la temporisation qui évite le déclenchement sur les régimes transitoires élimine également les défauts répétitifs de courte durée.

PARTIE C : ETUDE DE L'IMPEDANCE DE COMPENSATION

Voir le schéma de principe en annexe 3

L'impédance de compensation doit être accordée en permanence à la capacité homopolaire du réseau afin de prévoir le courant de défaut lorsque celui-ci apparaît.

Elle est constituée :

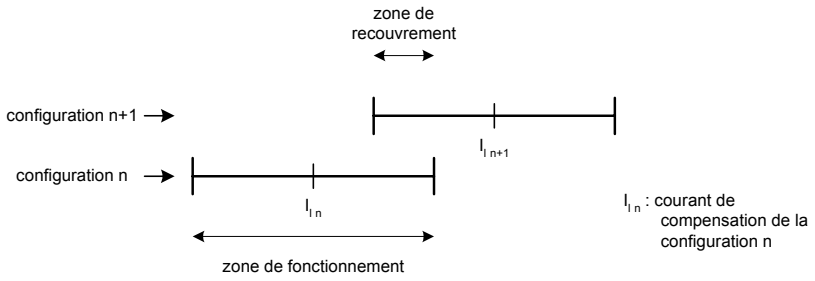
- d'une bobine de point neutre permettant la réalisation du neutre ;
- d'un ensemble de bobines permettant l'accord ;
- de deux résistances permettant le contrôle du courant actif de défaut ;
- d'un système d'accord automatique qui réalise la détermination de l'impédance homopolaire du réseau, le réglage des bobines d'accord et des résistances de contrôle du courant actif.

Le type de défaut envisagé ici est un défaut de type A : défaut franc phase 1 – terre.

C1. Étude des bobines d'accord :

Les interrupteurs S_1 à S_4 permettent de réaliser des configurations qui fixent le courant de compensation pour une certaine plage de variation du courant capacitif résiduel du réseau Ic

- Entre chaque configuration, il existe une plage de recouvrement de 29 A.
- Le courant de défaut maximal ne doit pas dépasser 40 A avec une composante active de 20 A minimum.
- Le courant de compensation de la bobine B_1 est de 40 A.
- Les interrupteurs S_5 et S_6 sont ouverts.



- Les bobines sont considérées comme une réactance en parallèle avec une résistance.

QC 1. Calculer le courant de désaccord $I_{des} = |\underline{I}_c - \underline{I}_L|$ maximum autorisé.

Le courant de désaccord correspond à la partie réactive du courant de défaut I_d. La composante active I_a circule dans la résistance R_n.

$$I_{des_{max}} = \sqrt{I_d^2 - I_a^2} = \sqrt{40^2 - 20^2} = 34{,}64A$$

QC 2. Compléter le document réponse DRQC2 en précisant pour chaque configuration le courant de compensation et la plage de fonctionnement.

La plage de fonctionnement est de 2 x 34,64 A autour du courant de compensation choisi.
Pour la configuration N°1, le courant de compensation est de 40 A. La plage de fonctionnement sera donc de 5,36A à 74,64 A.
En tenant compte de la plage de recouvrement de 29A, l'écart entre deux configurations est de :
34,64 – 29 + 34,64 = 40,28 A.
On retiendra un écart de 40 A afin de réaliser le système à réglage discret.
Voir document réponse DRQC2.

QC 3. Préciser le courant de compensation des bobines B_1, B_2, B_3 et B_4 puis compléter l'état des interrupteurs S_1 à S_4 pour les différentes configurations (document réponse DRQC3).

Courant de compensation des bobines :

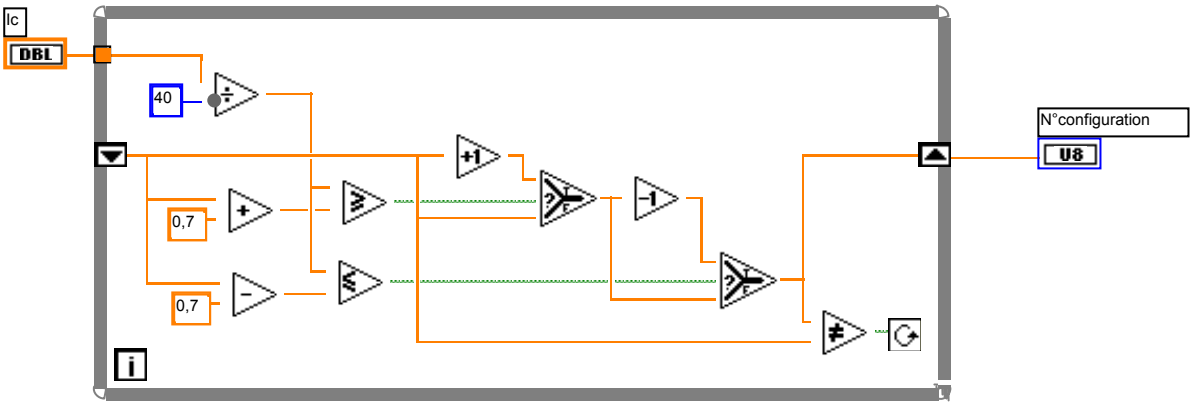
- B1 : 40 A
- B2 : 80 A
- B3 : 160 A
- B4 : 420 A

Voir document réponse DRQC3

QC 4. Quelle est l'utilité des plages de recouvrement prévu entre chaque configuration.

Les plages de recouvrement permettent de positionner un trigger afin de réduire les manœuvres des interrupteurs lorsque le courant à compenser se situe à la limite de deux zones de fonctionnement.

Le numéro de configuration est déterminé en fonction du courant capacitif résiduel du réseau Ic par le programme graphique ci-dessous. Le détail des fonctions est présenté dans le document annexe 4.



QC 5. Pour un courant I_c variant progressivement de 200 A à 400 A, compléter le document réponse DRQC5 en précisant le numéro de configuration, le courant de compensation et en traçant la courbe du courant de désaccord en fonction de I_c.

Voir document réponse DRQC5

QC 6. Pour un courant I_c variant progressivement de 400 A à 200 A, compléter le document réponse DRQC6 en précisant le numéro de configuration, le courant de compensation et en traçant la courbe du courant de désaccord en fonction de I_c.

Voir document réponse DRQC6.

QC 7. Pour une configuration donnée, calculer le courant actif maximum permis.

Les seuils de déclenchement des triggers sont à ± 0,7 x 40 = ± 28 A du courant de compensation.

Le courant de défaut ne doit pas dépasser 40 A.

$$I_{a_{max}} = \sqrt{40^2 - 28^2} = 28{,}57\,A$$

QC 8. Calculer la plage possible de la résistance de contrôle du courant actif sachant qu'une marge d'erreur de +/-1 A est prévue sur le courant actif

En tenant compte d'une marge d'erreur de ± 1A,

$$I_{a_{min}} = 20 + 1 = 21A \rightarrow R_{max} = \frac{E}{I_{a_{min}}} = 550\Omega$$

$$I_{a_{max}} = 28,57 - 1 = 27,57A \rightarrow R_{min} = \frac{E}{I_{a_{max}}} = 419\Omega$$

Les résistances du modèle série des bobines sont :

- Bobine B_1 : R_{s1} = 7,57 Ω
- Bobine B_2 : R_{s2} = 6,7 Ω
- Bobine B_3 : R_{s3} = 3,36 Ω
- Bobine B_4 : R_{s4} = 1,37 Ω

QC 9. Exprimer les grandeurs X_p et R_p du schéma équivalent parallèle d'une bobine en fonction des grandeurs R_s et X_s du schéma équivalent série.

$$\underline{Y}_p = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{jX_p}$$

$$\underline{Y}_s = \frac{1}{R_s + jX_s} = \frac{R_s - jX_s}{R_s^2 + X_s^2}$$

$$R_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{R_s} = R_s\left(1 + Q^2\right) \quad \text{avec} \quad Q = \frac{X_s}{R_s}$$

$$X_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{X_s} = X_s\left(1 + \frac{1}{Q^2}\right)$$

QC 10. Calculer la réactance parallèle de chaque bobine.

$$X_{p1} = \frac{E}{I_{l1}} = \frac{20000}{\sqrt{3} \cdot 40} = 288,7\Omega$$

$$X_{p2} = \frac{E}{I_{l2}} = \frac{20000}{\sqrt{3} \cdot 80} = 144,3\Omega$$

$$X_{p3} = \frac{E}{I_{l3}} = \frac{20000}{\sqrt{3} \cdot 160} = 72,2\Omega$$

$$X_{p4} = \frac{E}{I_{l4}} = \frac{20000}{\sqrt{3} \cdot 320} = 36,1\Omega$$

QC 11. Exprimer R_p en fonction de R_s et X_p.

$$X_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{X_s} \rightarrow X_p X_s = R_s^2 + X_s^2 \rightarrow X_s^2 - X_p X_s + R_s^2 = 0$$

$$X_s = \frac{X_p \pm \sqrt{X_p^2 - 4R_s^2}}{2}$$

$$R_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{R_s}$$

$$R_p = R_s + \frac{\left(X_p \pm \sqrt{X_p^2 - 4R_s^2}\right)^2}{4R_s}$$

$$\text{ou } R_p = \frac{X_p}{2R_s}\left(X_p \pm \sqrt{X_p^2 - 4R_s^2}\right)$$

QC 12. Calculer la résistance parallèle de chaque bobine.

Deux solutions théoriques possibles pour le calcul de R_p, mais on remarque que le courant actif est contenu dans l'intervalle 20 A ; 28,57 A et que le courant réactif est de 40 A pour la bobine B_1 jusqu'à 320 A pour la bobine B_4. Le coefficient de surtension Q des bobines doit être supérieur à 1.
On ne retiendra que la solution donnant le plus grand coefficient de surtension :

$$Q = \frac{R_p}{X_p} = \frac{X_s}{R_s}$$

$$R_p = R_s + \frac{\left(X_p + \sqrt{X_p^2 - 4R_s^2}\right)^2}{4R_s} \quad \text{ou} \quad R_p = \frac{X_p}{2R_s}\left(X_p + \sqrt{X_p^2 - 4R_s^2}\right)$$

R_{p1} = 11 kΩ, R_{p2} = 3,1 kΩ, R_{p3} = 1,55 kΩ, R_{p4} = 950 Ω

Le transformateur T_R à un rapport de transformation m = 500 / 12000 (annexe 3)

QC 13. Exprimer la relation permettant de déterminer la plage de la résistance parallèle additionnelle selon l'état des interrupteurs S_1 à S_4, puis la calculer pour chaque configuration (compléter le document réponse DRQC13).

La résistance parallèle R_p doit être comprise entre 419 Ω et 550 Ω quelque soit la configuration.
On défini par s_1, s_2, s_3 et s_4 les états des interrupteurs, avec s_x nombre entier $\in$ [0, 1].
La résistance additionnelle R_{pa} doit satisfaire la relation : $\frac{1}{R_{pa}} = \frac{1}{R_p} - \frac{s_1}{R_{p1}} - \frac{s_2}{R_{p2}} - \frac{s_3}{R_{p3}} - \frac{s_4}{R_{p4}}$

Voir document réponse pour la valeur de la résistance additionnelle dans chaque configuration.

QC 14. Proposer en le justifiant des valeurs de R_1 et R_2 permettant de maintenir le courant actif à une valeur supérieure à 20A, puis compléter l'état des interrupteurs S_5 et S_6 sur le document réponse DRQC14.

Vu du coté haute tension, les résistances additionnelles R_1 et R_2 valent :

$R'_1 = \frac{R_1}{m^2}$ et $R'_2 = \frac{R_2}{m^2}$

Plusieurs conditions sont à satisfaire pour le choix des résistances additionnelles R_1 et R_2.

Les interrupteurs s_5 et s_6 imposent quatre configurations au maximum :

- pas de résistances additionnelles ;
- résistance R'_1;
- résistance R'_2;
- résistance R'_1 en parallèle avec R'_2.

Parmi les 15 configurations de l'impédance de compensation, il faut définir 4 groupes. Dans chaque groupe, une seule valeur de la résistance additionnelle doit satisfaire toutes les configurations de ce groupe.

Ainsi on obtient le découpage suivant :
Groupe 1 : configuration 14 – 15 : pas de résistances additionnelles ;
Groupe 2 : configurations 10 → 15 : 1670 Ω < résistances additionnelles < 2257 Ω ;
Groupe 3 : configuration 4 → 9 : 804 Ω < résistances additionnelles < 852 Ω ;
Groupe 4 : configuration 1 → 3 : 506 Ω < résistances additionnelles < 579 Ω ;

En choisissant une valeur médiane pour le groupe 2 et 3, on obtient :
R'_1 = 1800 Ω et R'_2 = 825 Ω ce qui donne une résistance équivalente pour le groupe 4 de 567 Ω.

Soit $R_1 = m^2R'_1$ = 3,1 Ω et $R_2 = m^2R'_2$ = 1,43 Ω.

Le courant de défaut n'étant pas permanent, il est indispensable de faire un dimensionnement thermique des conducteurs des bobines. Afin de respecter la valeur minimale du courant actif à 20A, la variation relative du modèle parallèle $\left|\frac{\Delta R_p}{R_p}\right|$ de chaque bobine ne doit excéder 5% pendant la phase de défaut.

Durant le défaut, la résistance du modèle série varie linéairement avec la température alors que la réactance série reste constante.

QC 15. Après linéarisation autour du point θ = 20°C, exprimer la variation de température $\Delta\theta$ des conducteurs en fonction de $\left|\frac{\Delta R_p}{R_p}\right|$.

$$R_s = R_{s0}(1+\alpha\theta)$$

$$\frac{dR_s}{d\theta} = \alpha R_{s0}$$

$$R_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{Rs}$$

$$\frac{dR_p}{dR_s} = \frac{R_s^2 - X_s^2}{R_s^2}$$

En linéarisant la fonction $R_p(R_s)$ pour la valeur de R_s à 20°C on obtient :

$$\Delta R_p = \left(\frac{R_{s20}^2 - X_{s20}^2}{R_{s20}^2}\right)\Delta R_s$$

$$\Delta R_p = \left(\frac{R_{s20}^2 - X_{s20}^2}{R_{s20}^2}\right)\alpha R_{s0}\Delta\theta \rightarrow \Delta\theta = \frac{\Delta R_p}{\alpha R_{s0}\left(1-Q^2\right)}$$

$$\Delta\theta = \frac{\frac{\Delta R_p}{R_p}}{\alpha\frac{R_{s0}}{R_p}\left(1-Q^2\right)} = \frac{\frac{\Delta R_p}{R_p}}{\frac{\alpha}{1+20\alpha}\cdot\frac{R_s^2}{R_s^2+X_s^2}\left(1-Q^2\right)} = \frac{\frac{\Delta R_p}{R_p}}{\frac{\alpha}{1+20\alpha}\cdot\frac{1-Q^2}{1+Q^2}}$$

Comme Q est nettement supérieur à 1, on obtient :

$$\Delta\theta = -\frac{\Delta R_p}{R_p}\cdot\frac{1+20\alpha}{\alpha} \text{ ou } \Delta\theta = \left|\frac{\Delta R_p}{R_p}\right|\cdot\frac{1+20\alpha}{\alpha}$$

Les spécifications EDF précisent que la durée maximale d'un défaut est de Δt = 10 secondes.

QC 16. Exprimer la section des conducteurs des bobines en fonction de ρ, m_v, c, I, $\Delta\theta$ et Δt.

$$m\cdot c\cdot d\theta = RI^2dt \rightarrow m_v\cdot l\cdot s\cdot c\cdot d\theta = \rho\frac{l}{s}I^2dt$$

$$d\theta = \frac{\rho}{m_v\cdot c\cdot s^2}I^2dt \rightarrow s = \sqrt{\frac{\rho}{m_v\cdot c}\cdot\frac{\Delta t}{\Delta\theta}}\cdot I$$

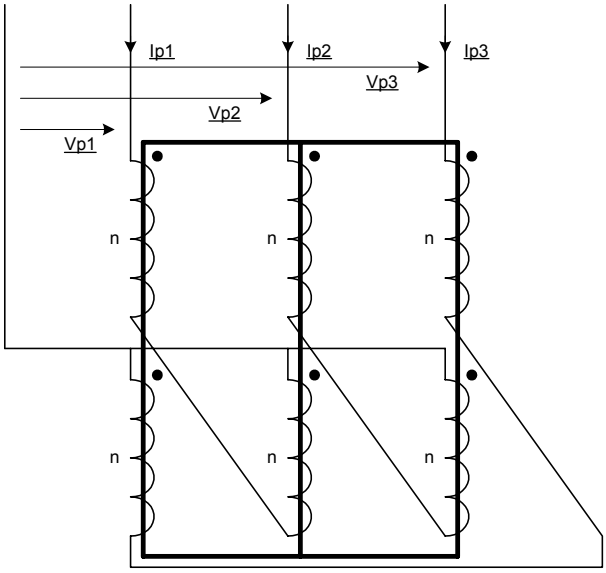
QC 17. Calculer les sections des conducteurs des bobines B_1, B_2, B_3 et B_4.

Ce qui donne pour l'application numérique avec $\left|\frac{\Delta R_p}{R_p}\right| = 0.05$, $\Delta\theta$ = 13,5°C.

Et comme section de conducteurs

- Bobine 1 : s = 2,5 mm²
- Bobine 2 : s = 5 mm²
- Bobine 3 : s = 10 mm²
- Bobine 4 : s = 20 mm²

C2. Étude de la bobine de point neutre (BPN) :



La bobine de point neutre permet de réaliser un point neutre d'impédance très faible.
Les résistances ainsi que les inductances de fuites des enroulements sont négligées.
La réluctance d'une colonne du circuit magnétique est $\mathcal{R}$ = 9500 H^{-1}
Les enroulements comportent chacun n = 770 spires.

QC 18. Déterminer l'impédance directe $\underline{Z}_d$ de la BPN.

$\underline{V}_{p1}, \underline{V}_{p2}, \underline{V}_{p3}$ système direct de tension

$$\underline{V}_{p1} = jn\omega\underline{\Phi}_1 - jn\omega\underline{\Phi}_2 = jn\omega\underline{\Phi}_1\left(1-a^2\right)$$

$$n\left(\underline{I}_{p1} - \underline{I}_{p3}\right) = n\underline{I}_{p1}\left(1-a\right) = \Re\underline{\Phi}_1$$

$$\underline{V}_{p1} = j\frac{n^2}{\Re}\omega\underline{I}_{p1}\left(1-a\right)\left(1-a^2\right) = 3j\frac{n^2}{\Re}\omega\underline{I}_{p1}$$

$$\underline{Z}_d = \frac{\underline{V}_{p1}}{\underline{I}_{p1}} = 3j\frac{n^2}{\Re}\omega$$

Ce qui donne en numérique : $\underline{Z}_d = 58820j$ et $Z_d = 58{,}8k\Omega$

QC 19. Déterminer l'impédance homopolaire $\underline{Z}_0$ de la BPN.

$\underline{V}_{p1}, \underline{V}_{p2}, \underline{V}_{p3}$ système homopolaire de tension

$$\underline{V}_{p1} = \underline{V}_{p2} = \underline{V}_{p3} = \underline{V}_{p0}$$

$$\underline{V}_{p0} = jn\omega\underline{\Phi}_0 - jn\omega\underline{\Phi}_0 = 0$$

$$n\underline{I}_{p0} - n\underline{I}_{p0} = \Re\underline{\Phi}_0 = 0 \rightarrow \underline{\Phi}_0 = 0 \ \forall \ \underline{I}_{p0}$$

$$\underline{Z}_0 = \frac{\underline{V}_{p0}}{\underline{I}_{p0}} = 0$$

QC 20. Calculer la puissance réactive consommée par le BPN en l'absence de défaut.

En l'absence de défaut $Q_p = 3\dfrac{V^2}{Z_d} = \dfrac{U^2}{Z_d} = 6{,}8kVar$

QC 21. Pour quelles raisons le constructeur de l'impédance de compensation à réalisé une bobine de point neutre plutôt que d'utiliser le neutre du transformateur ?

- La réalisation d'un point neutre permet de mettre en place un régime de neutre compensé au secondaire d'un transformateur couplé en triangle.
- Avec un couplage étoile au secondaire, l'impédance homopolaire du transformateur dépend du couplage primaire et de la forme du circuit magnétique. La bobine de point neutre permet de fixer avec précision cette impédance de manière à assurer un contrôle précis du courant de défaut par les bobines de compensation.

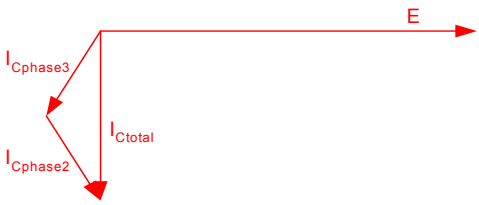
La longueur totale des lignes en service est de 125 km.

QC 22. Réaliser une synthèse du problème en complétant les cadres du document réponse DRQC22 avec la valeur complexe du courant correspondant.
Vous justifierez chaque valeur en vous appuyant sur la réponse à une question du problème ou par un calcul simple.

- En QA17., on a montré qu'en cas de défaut le courant capacitif du réseau vaut $-3jC\omega E$. Ce qui donne pour 125 km un courant de -272j.
- Le courant dans le condensateur de la phase 1 vaut 0 car il est court-circuité par le défaut.
- Le courant dans le condensateur de la phase 2 est en avance de π/2 sur $\underline{U}_{21}$.
- Le courant dans le condensateur de la phase 3 est en avance de π/2 sur $\underline{U}_{31}$.
  Ces deux derniers courants se composent pour donner le courant capacitif total.

$$\underline{I}_{Cphase3} = -\frac{272}{\sqrt{3}}\sin 30° - \frac{272}{\sqrt{3}}\cos 30° j = -78{,}5 - 136j$$

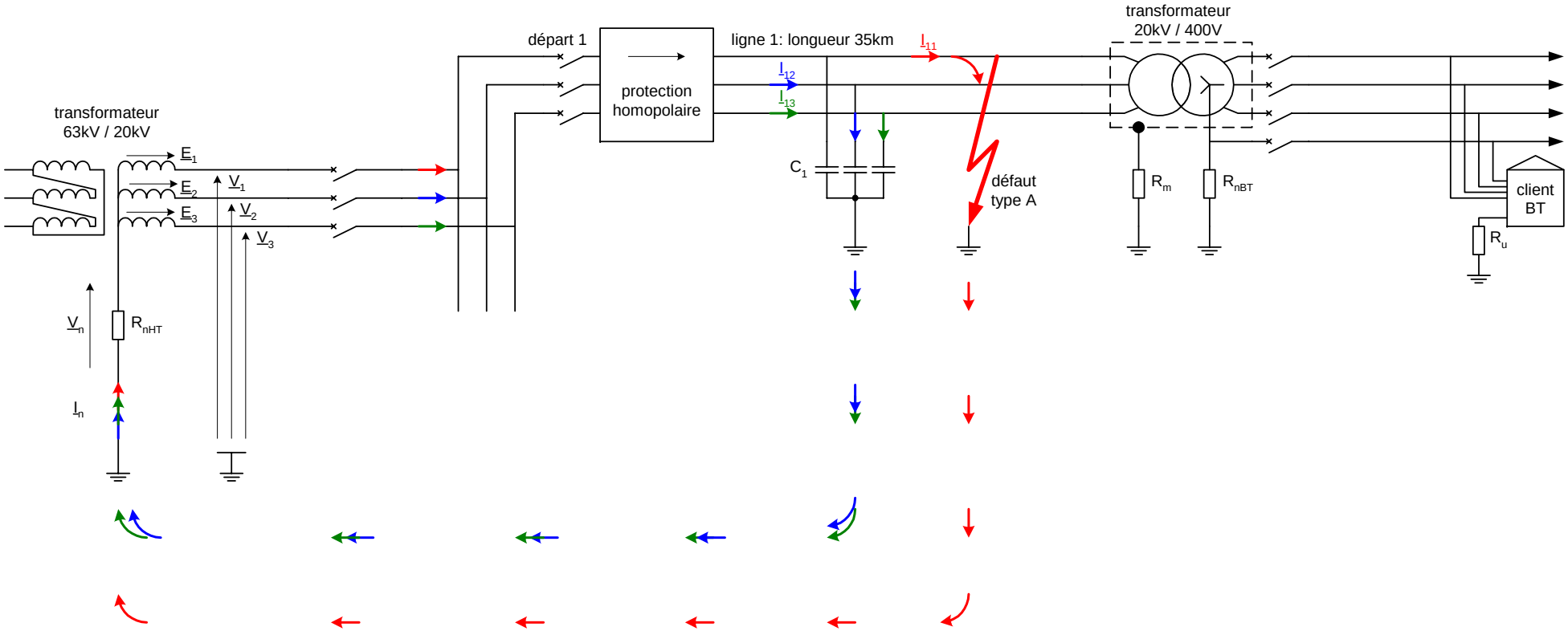
$$\underline{I}_{Cphase2} = \frac{272}{\sqrt{3}}\sin 30° - \frac{272}{\sqrt{3}}\cos 30° j = 78{,}5 - 136j$$



- Si le courant capacitif du réseau vaut 272 A, alors l'impédance de compensation se fixe sur 280 A (DRQC6 et DRQC7).
  La composante réactive du courant de l'impédance de compensation vaut -280j.
- Dans la configuration 7 correspondant à 280 A, les interrupteurs s_1, s_2, s_3 et s_6 sont fermés (document réponse DRQC2-3-13-14).
  La résistance parallèle équivalente s'écrit : $\frac{1}{R_{pe}} = \frac{1}{R_{p1}} + \frac{1}{R_{p2}} + \frac{1}{R_{p3}} + \frac{1}{R'_2}$ soit :
  R_{pe} = 440 Ω
  La composante active du courant dans l'impédance de compensation vaut
  $\frac{E}{R_{pe}} = 26{,}2A$ (composante active supérieure à 20 A).
- Le courant dans le défaut se compose du courant actif et du courant de désaccord soit 26,2 - 8j (QC1). Ce courant est comme spécifié, inférieure à 40 A.
- Dans la bobine de point neutre les courants dus à l'impédance directe sont négligeables devant le courant homopolaire (QC18).
  Le couplage des enroulements de la bobine de point neutre impose $i_1 = i_2 = i_3 = i_n/3$.
  Le courant dans chaque phase de la bobine de point neutre vaut 1/3 du courant actif et réactif de l'impédance de compensation soit 8,73 -93,3j.
- Les courants dans les enroulements du secondaire du transformateur s'obtiennent en appliquant la loi des nœuds.

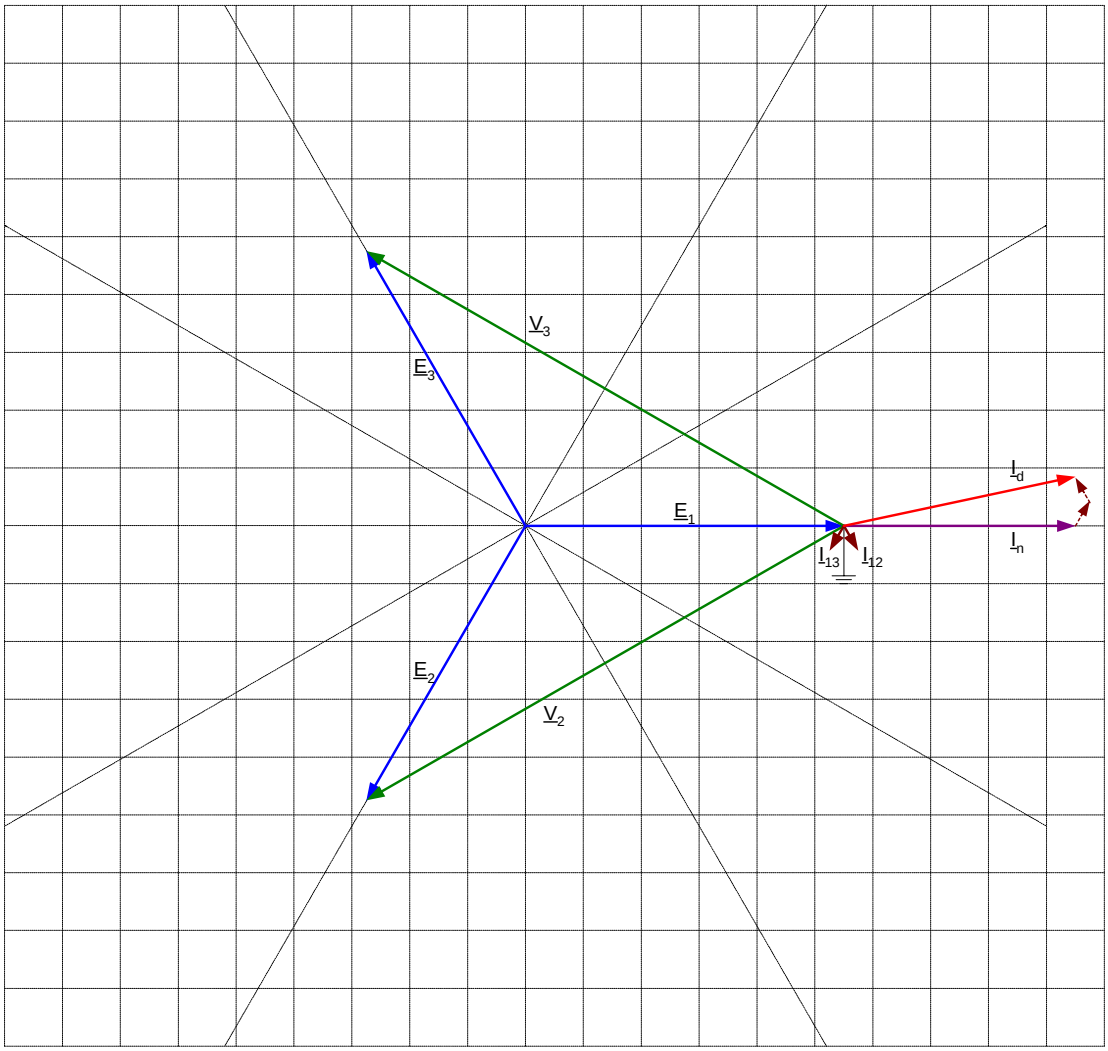
Corrigé document réponse DRQA11

Document réponse DRQA11



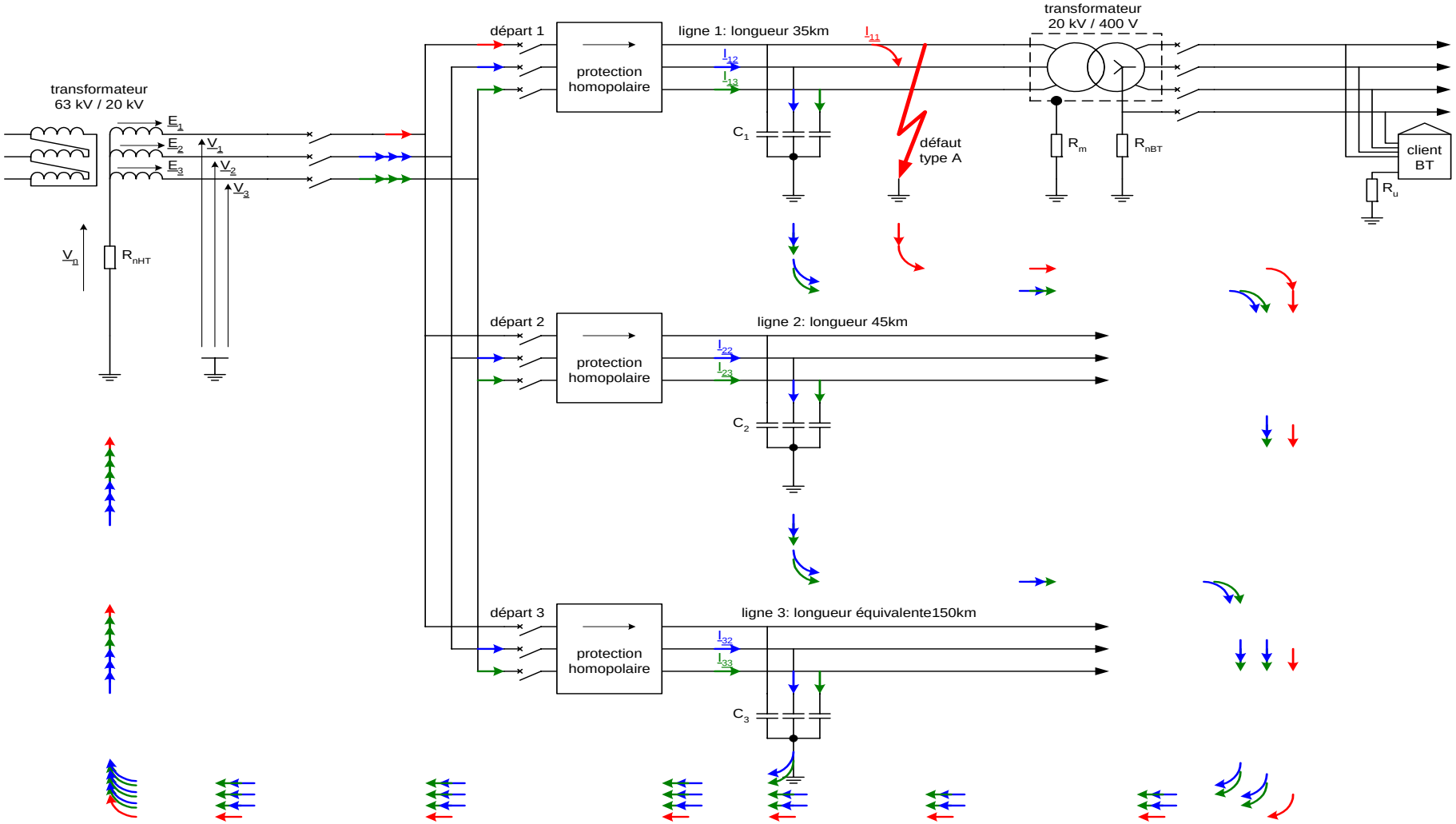
Corrigé document réponse DRQA15

Document réponse DRQA15



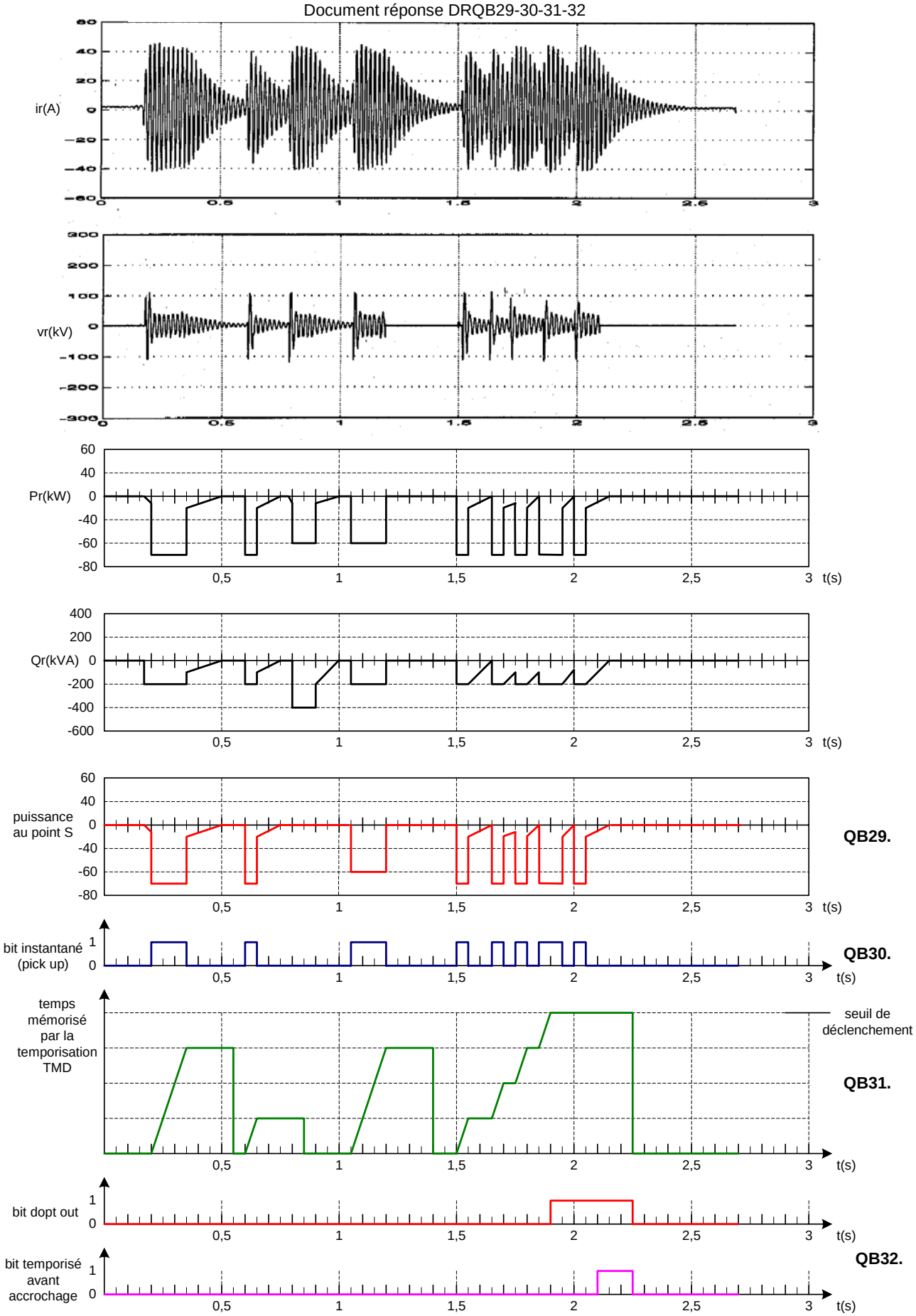
Corrigé document réponse DRQA17

Document réponse DRQA17



Corrigé document réponse DRQB29-30-31-32

Document réponse DRQB29-30-31-32



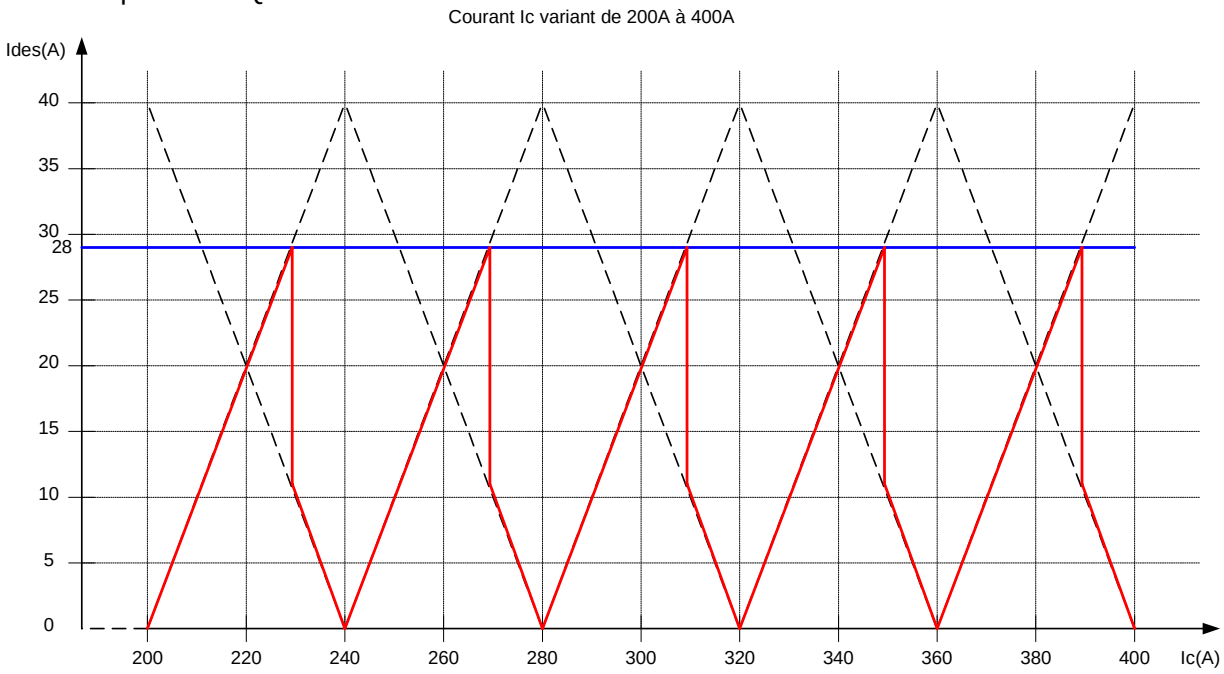
Corrigé Document réponse DRQC2-3-13-14

Document réponse DRQC2-3-13-14

Question QC2			Question QC3				Question QC13	Question QC14	
N° de configuration	Courant de compensation (A)	Plage de fonctionnement (A)	S1	S2	S3	S4	Plage de résistance (Ω)	S5	S6
1	40	5,36 → 74,64	1	0	0	0	435 → 579	1	1
2	80	45,36 → 114,6	0	1	0	0	484 → 669	1	1
3	120	85,36 → 154,6	1	1	0	0	506 → 712	0	1
4	160	125,4 → 194,6	0	0	1	0	574 → 852	0	1
5	200	165,4 → 234,6	1	0	1	0	605 → 924	0	1
6	240	205,4 → 274,6	0	1	1	0	704 → 1176	0	1
7	280	245,4 → 314,6	1	1	1	0	752 → 1317	0	1
8	320	285,4 → 354,6	0	0	0	1	749 → 1306	0	1
9	360	325,4 → 394,6	1	0	0	1	804 → 1482	0	1
10	400	365,4 → 434,6	0	1	0	1	988 → 2257	1	0
11	440	405,4 → 474,6	1	1	0	1	1085 → 2840	1	0
12	480	445,4 → 514,6	0	0	1	1	1450 → 8306	1	0
13	520	485,4 → 554,6	1	0	1	1	1670 → 33920	1	0
14	560	525,4 → 594,6	0	1	1	1	2722 → +∞	0	0
15	600	565,4 → 634,6	1	1	1	1	3617 → +∞	0	0

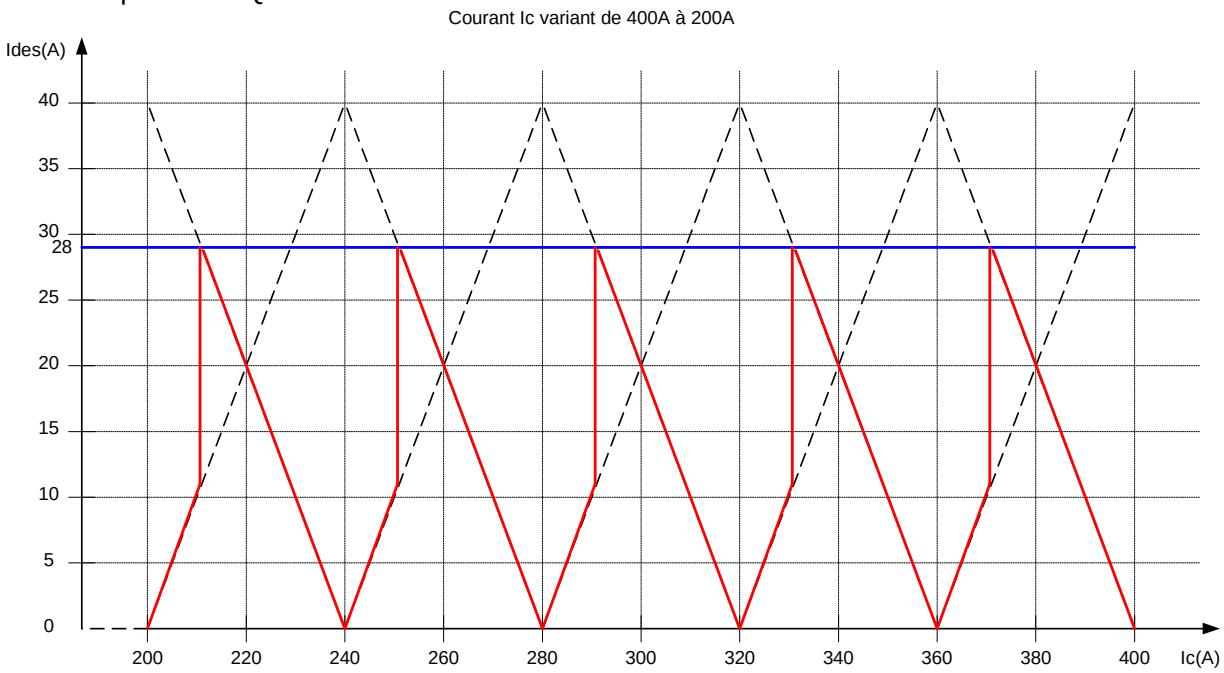
Corrigé documents réponse DRQC5 – DRQC6

Document réponse DRQC5

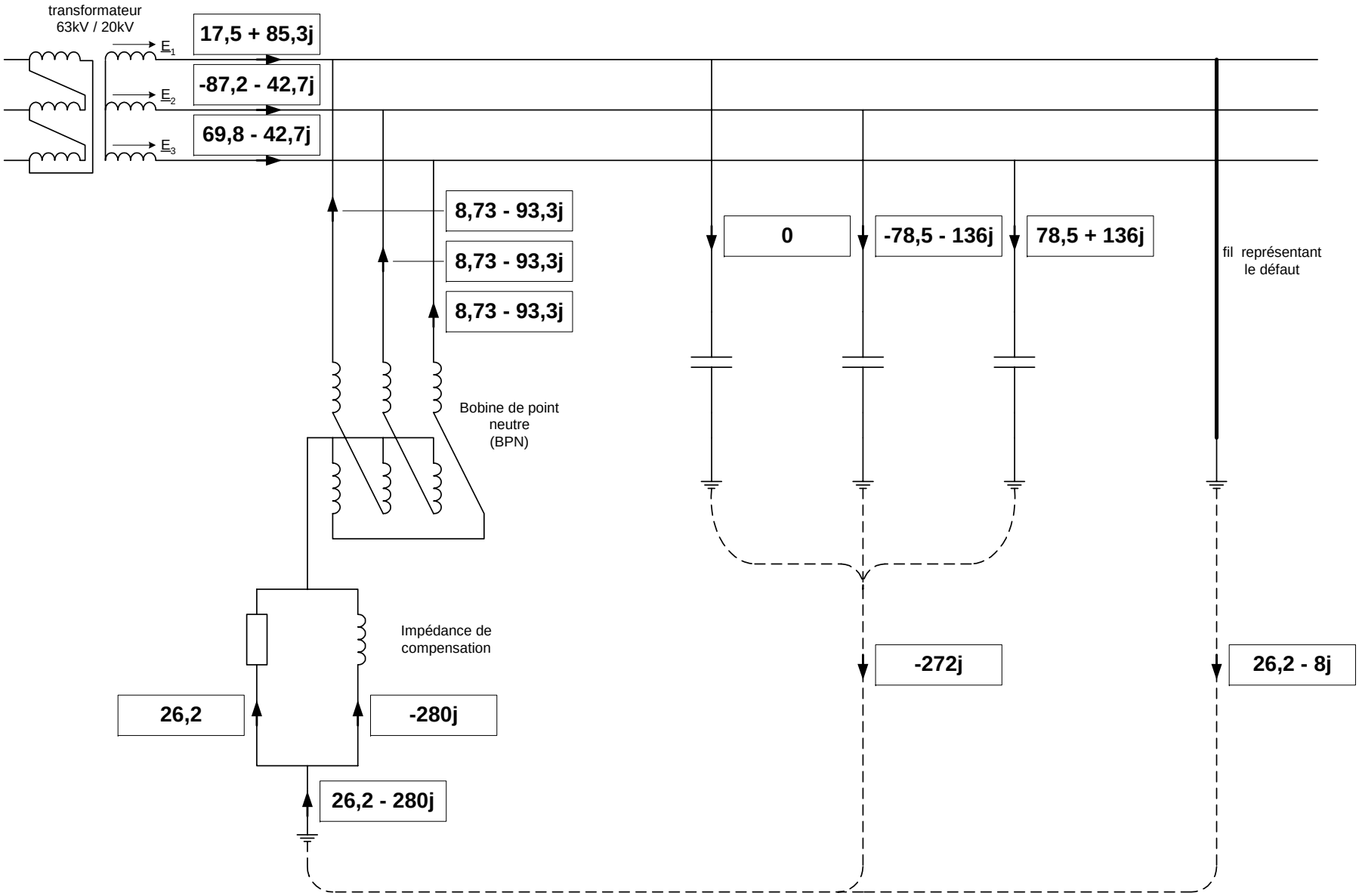


N° configuration	5	6	7	8	9	10
Courant de compensation (A)	200	240	280	320	360	400

Document réponse DRQC6



N° configuration	5	6	7	8	9	10
Courant de compensation (A)	200	240	280	320	360	400

Corrigé document réponse DRQC22

Document réponse DRQC22