

Table des matières

Généralités	18-2
Types de systèmes de distribution de l'alimentation	18-3
Analyse du système	18-6
Technologie de disjoncteur limiteur de courant	18-7
Protection contre les surintensités et coordination	18-8
Protection contre les défauts à la terre	18-9
Valeurs nominales d'une combinaison de dispositifs connectés en série	18-15
Valeurs nominales des harmoniques / du coefficient K	18-16
Tableau 1A :	
Courants de pleine charge de moteurs CA triphasés à induction	18-18
Tableau 1B :	
Courants de pleine charge (A) de moteurs CA monophasés	18-18
Tableau 1C :	
Courants de pleine charge (A) de moteurs CC	18-18
Tableau 2 :	
Formules électriques pour calculer l'intensité en ampères, la puissance en kilowatts et la consigne kVA	18-18
Tableaux de conversion	18-19

Généralités

Pour les applications d'interrupteurs à fusibles et de disjoncteurs, il faut tenir compte des facteurs suivants :

1. Tension du circuit.
2. Courant admissible du circuit.
3. Fréquence de la source d'alimentation.
4. Conditions d'exploitation.
5. Courant de défaut disponible.

Tension du circuit — La tension du système ne doit pas dépasser la tension nominale du disjoncteur, du fusible ou de l'interrupteur.

Courant admissible du circuit — Le courant nominal en régime continu du fusible ou du disjoncteur ne doit pas dépasser le courant admissible des conducteurs. Lorsque le courant admissible du conducteur ne correspond pas aux intensités nominales des fusibles ou disjoncteurs, la consigne plus élevée suivante du fusible ou du disjoncteur est permise pourvu qu'elle ne dépasse pas le courant admissible du conducteur de plus de 25 %. On peut déroger à cette règle pour les circuits de moteurs ou tout autre circuit dans lequel des courants d'appel élevés peuvent persister pendant une période relativement longue.

Fréquence de la source d'alimentation

— Les disjoncteurs et les interrupteurs à fusibles sont étalonnés pour une utilisation avec courant continu ou courant alternatif de 48 à 68 Hz. Pour les fréquences supérieures à 62 Hz, certains fusibles, interrupteurs et disjoncteurs doivent être déclassés. Ce déclassement varie en fonction du type et de la taille des dispositifs de protection. Pour de plus amples renseignements, consultez votre représentant local.

Conditions d'exploitation — Les disjoncteurs et les fusibles sous boîtier moulé sont étalonnés sans coffret, conformément aux normes UL et CSA. Les bonnes pratiques d'ingénierie exigent que les charges continues ne dépassent pas 80 % de l'intensité nominale du disjoncteur ou du fusible pour la plupart des types de coffrets.

Connexions électriques — Les disjoncteurs sous boîtier moulé doivent être connectés au moyen de conducteurs à 60 ou 75 °C dont l'intensité nominale ne dépasse pas 125 A. Les disjoncteurs à intensité nominale de plus 125 A doivent exclusivement être câblés au moyen de conducteurs à 75 °C, à moins de mention contraire sur l'étiquette du disjoncteur lui-même.

Remarque : Des exceptions à cette règle sont énoncées dans le Code canadien de l'électricité. Les conducteurs doivent être déclassés conformément au Code canadien de l'électricité en termes de température ambiante et de charge continue. Les conducteurs assujettis à une charge continue doivent être déclassés à 80 % de leur courant permanent admissible, à moins qu'elle ne soit fournie par un ensemble, comprenant notamment un dispositif de protection contre les surintensités homologué pour un fonctionnement continu à 100 % de son intensité maximale.

Lorsque le type de charge est inhabituel, intermittent, ou encore s'il donne lieu à des courants de crête momentanés, à l'instar des charges de moteurs, il est nécessaire de tenir compte de la chaleur produite par le dispositif de protection au fil du temps. Le régime d'utilisation d'un moteur que l'on arrête et démarre fréquemment peut nécessiter l'utilisation d'un disjoncteur ou de fusibles dotés d'une intensité nominale supérieure à celle d'un moteur qui est démarré occasionnellement.

La présence de poussière excessive, d'humidité, de fumées corrosives ou d'une atmosphère explosive nécessite l'utilisation de coffrets adaptés à de telles atmosphères. Pour les applications dans des régions où la formation de champignons peut poser problème, certains disjoncteurs doivent être traités.

Courant de défaut disponible — Le pouvoir de coupure du disjoncteur ou de l'interrupteur à fusibles doit être supérieur au courant de court-circuit disponible au point d'application. Le courant de court-circuit associé à certaines sources d'alimentation, tels que les générateurs entraînés par moteur, est limité. Les caractéristiques du dispositif de protection doivent être sélectionnées de manière à éviter de tels défauts. Certains systèmes nécessitent une étude approfondie des caractéristiques du dispositif de protection afin d'assurer une protection et une coordination convenant à toutes les valeurs possibles de courant de défaut. Votre représentant peut vous aider à réaliser de telles études de coordination.

Données techniques

Types de systèmes de distribution de l'alimentation

Sélection

Les ingénieurs en conception de système tiennent compte de plusieurs éléments fondamentaux afin de concevoir un système de distribution de l'alimentation exceptionnel et économique pour alimenter les charges actuelles et futures. Parmi ceux-ci, on compte :

- Sécurité
- Fiabilité
- Entretien
- Souplesse
- Régulation de tension
- Investissement initial
- Simplicité de fonctionnement

Les caractéristiques du réseau électrique disponible au site du bâtiment, les types de charge, la qualité d'alimentation requise, ainsi que la taille et la configuration du bâtiment sont autant de facteurs importants qui influenceront la conception du système et la disposition du circuit.

Quatre dispositions de circuit de base sont utilisées pour la distribution de l'énergie électrique. Il s'agit des dispositions de circuit radial, à sélection principale, à sélection secondaire et à réseau secondaire. La discussion suivante portant sur ces dispositions de circuit couvre les circuits haute tension et basse tension. Le lecteur doit se rappeler que les circuits et les postes haute tension peuvent appartenir à la société d'électricité ou au propriétaire du bâtiment, compte tenu des tarifs d'électricité, des pratiques et des exigences de la société d'électricité qui dessert ce bâtiment spécifique.

Système radial

Lorsque l'alimentation est acheminée au bâtiment à la tension d'utilisation, la façon la plus simple et économique de distribuer l'énergie consiste à utiliser une disposition de circuit radial. En effet, le système radial est le plus facile à utiliser et celui qui nécessite le moins d'investissement. Il convient aux installations plus petites où la continuité du service revêt moins d'importance.

Le circuit de branchement basse tension est acheminé au bâtiment par l'entremise du matériel de branchement et se termine au

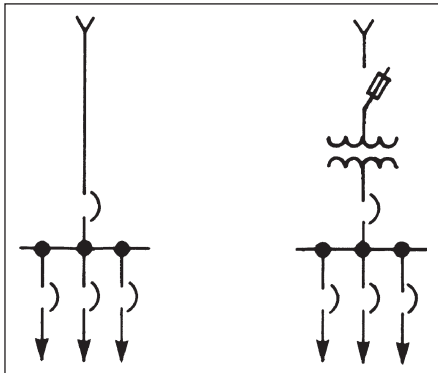


Figure 1. Systèmes radiaux

niveau du principal ensemble d'appareillage de connexion, tableau de contrôle ou panneau de distribution. Les circuits d'alimentation sont fournis aux charges ou aux autres sous-tableaux de contrôle, boîtiers de distribution ou panneaux de distribution. La Figure 1 illustre les deux formes de dispositions de circuit radial les plus fréquentes. Dans des conditions normales d'exploitation, la charge entière est acheminée par l'entremise d'un seul circuit d'alimentation d'entrée. Toutefois, l'alimentation haute tension est transmise par le biais du transformateur. Une panne au niveau du circuit d'alimentation, du transformateur ou de la barre omnibus principale occasionnera une interruption de l'alimentation pour toutes les charges. Une panne dans l'un des circuits principaux ou de dérivation doit être isolée du reste du système par le dispositif de protection de ce circuit. Ainsi, la continuité de l'alimentation est assurée pour toutes les charges à l'exception de celles qui sont desservies par le circuit fautif.

Une alimentation continue nécessite souvent de multiples chemins d'alimentation par opposition à un seul chemin d'alimentation électrique dans le système radial.

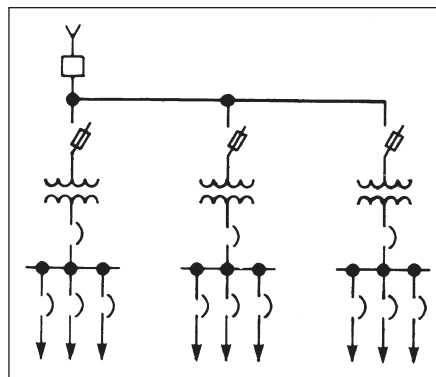


Figure 2. Systèmes radiaux étendus - Un circuit d'alimentation principal

Une panne dans le circuit d'alimentation principal de la disposition illustrée à la Figure 2 déclenchera le dispositif de protection principal et interrompra l'alimentation de toutes les charges. Lorsque la panne se produit dans un transformateur, l'alimentation peut être rétablie à toutes les charges à l'exception de celles qui sont desservies par ce transformateur. Si la panne se produit dans un circuit d'alimentation principal, on ne peut rétablir l'alimentation à aucune charge tant que la source de la panne n'a pas été éliminée. Puisqu'en règle générale plus de pannes se produisent dans les circuits d'alimentation que dans les transformateurs, il est logique de protéger individuellement chaque circuit d'alimentation principal, tel qu'illustré à la Figure 3. Cette disposition permet de limiter les interruptions occasionnées par une panne de circuit

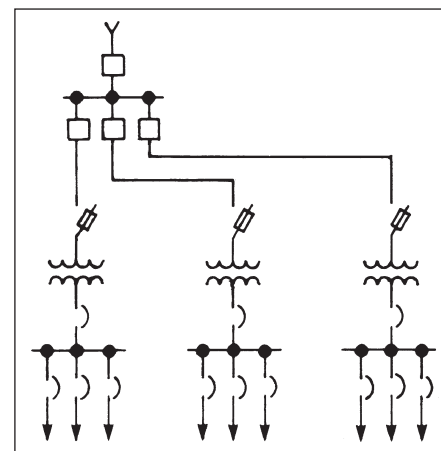


Figure 3. Systèmes radiaux étendus - Protection individuelle des circuits d'alimentation principaux

d'alimentation ou de transformateur pour les charges associées à l'équipement défectueux. Lorsqu'on utilise des disjoncteurs pour protéger l'alimentation principale, le coût du système est plus élevé. Même lorsqu'on emploie des interrupteurs à fusibles, le coût de la disposition de la Figure 3 dépassera celui de la disposition de la Figure 2.

Système à sélection principale

La disposition de circuit de la Figure 4 permet de réduire l'étendue et la durée des interruptions occasionnées par une panne du circuit d'alimentation principal. Cette caractéristique de fonctionnement repose sur l'utilisation de deux circuits d'alimentation principale et interrupteurs de charge qui permettent de connecter chaque transformateur de poste secondaire à l'un des deux circuits d'alimentation principaux. Chaque circuit d'alimentation principal doit disposer d'une capacité suffisante pour porter la charge totale du bâtiment.

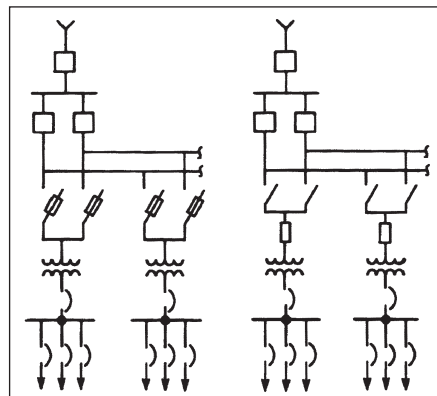


Figure 4. Systèmes à sélection principale

Dans des conditions normales de fonctionnement, les interrupteurs appropriés sont fermés de sorte à répartir la charge également entre les deux circuits d'alimentation principaux. Lorsqu'une panne se produit au niveau du circuit d'alimentation principal, l'alimentation n'est interrompue que pour la moitié de la charge. L'alimentation peut être rétablie pour toutes les charges en connectant les transformateurs hors courant à l'autre circuit d'alimentation principal. Les interrupteurs à sélection principale sont généralement activés manuellement. En outre, la durée de l'interruption pour la moitié de la charge est déterminée par le temps nécessaire pour réaliser la connexion. Une disposition de commutation large automatique peut être utilisée pour éviter toute interruption d'alimentation pour la moitié de la charge. Toutefois, les coûts supplémentaires de cette fonctionnalité automatique ne sont pas justifiés dans plusieurs applications. Lorsqu'une panne se produit dans un transformateur de poste secondaire, on peut rétablir l'alimentation pour toutes les charges à l'exception de celles qui sont desservies par le transformateur défectueux.

La disposition à sélection principale offre un niveau plus élevé de continuité de l'alimentation mais à un coût relativement plus élevé qu'un simple système radial en raison des câbles et de l'appareillage de connexion supplémentaires.

Système à sélection secondaire

Dans des conditions normales, la disposition à sélection secondaire de la Figure 5 fonctionne comme deux systèmes radiaux distincts. Le disjoncteur d'attache secondaire de chaque poste secondaire est généralement ouvert.

La charge acheminée depuis un poste à sélection secondaire doit être divisée également entre les deux sections de la barre omnibus. Lorsqu'une panne se produit dans un circuit d'alimentation principal ou un transformateur, l'alimentation est interrompue pour toutes les charges associées au circuit d'alimentation au transformateur défectueux. L'alimentation peut être rétablie vers toutes les barres omnibus secondaires en ouvrant d'abord l'interrupteur secondaire d'alimentation principale ou le disjoncteur associé au transformateur ou au circuit d'alimentation principal défectueux, puis en fermant le disjoncteur. Les deux disjoncteurs de circuit secondaire de transformateur de chaque poste doivent être interverrouillés avec le disjoncteur d'attache secondaire de manière à ce que les trois ne puissent être en position fermée simultanément. On prévient ainsi le fonctionnement parallèle de deux transformateurs et on réduit les responsabilités d'interruption imposées aux dispositifs de commutation secondaires. On élimine également la possibilité d'interruption de l'alimentation pour toutes les charges de la barre omnibus en cas de panne au niveau du circuit d'alimentation principal ou d'un transformateur.

Le coût du système à sélection secondaire

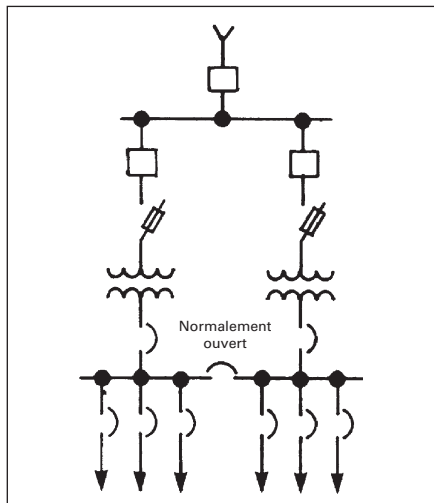


Figure 5. Système à sélection secondaire utilisant un poste à couplage direct et à sortie double

dépend de la capacité supplémentaire des transformateurs et des circuits d'alimentation principaux. La capacité minimale du transformateur et du circuit d'alimentation principal sera déterminée par les charges essentielles qui doivent être desservies dans des conditions de fonctionnement d'urgence. Lorsque l'alimentation doit être fournie pour toutes les charges lors de conditions d'urgence, alors chaque circuit d'alimentation principal doit posséder une capacité suffisante pour porter la charge totale, et chaque transformateur doit être capable de porter la charge totale de chaque poste.

Ce type de système est plus cher que le système radial ou à sélection principale, mais il permet de rétablir l'alimentation pour toutes les charges essentielles en cas de panne d'un circuit d'alimentation principale ou d'un transformateur. Le coût plus élevé résulte de la duplication de la capacité du transformateur dans chaque poste secondaire. On peut réduire ce coût en délestant des charges non essentielles.

Une modification de la disposition de circuit à sélection secondaire est illustrée à la Figure 6. Cette disposition comporte un seul transformateur dans chaque poste secondaire, mais les postes adjacents sont interconnectés par paires par un circuit d'attache à faible tension normalement ouvert. Lorsqu'un circuit d'alimentation principal ou un transformateur qui alimente une barre omnibus de poste secondaire est hors service, les charges essentielles de la barre omnibus de ce poste peuvent être alimentées à l'aide du circuit d'attache. Les aspects fonctionnels de ce système sont assez complexes si les deux postes sont distants. La meilleure disposition consiste en deux postes à couplage direct et à sortie double.

Système à réseau secondaire

Plusieurs bâtiments dotés de systèmes de distribution radiaux sont alimentés à la tension d'utilisation par des systèmes à réseau secondaire. Le système d'alimentation

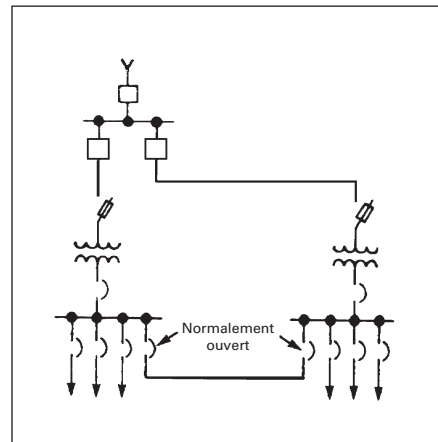


Figure 6. Système à sélection secondaire utilisant deux postes à sortie simple avec câble ou barre d'attache

par réseau assure un niveau de fiabilité d'alimentation relativement élevé. Le réseau d'alimentation électrique peut se présenter sous forme de réseau réparti ou de réseau ponctuel. Lorsque la demande du bâtiment est de l'ordre de 750 kVA ou plus, un réseau ponctuel peut être établi pour desservir le bâtiment. Dans les bâtiments où un niveau plus élevé de fiabilité de l'alimentation s'avère nécessaire, et dans lesquels l'installation d'un réseau ponctuel n'est pas possible, le système à réseau secondaire réparti est souvent utilisé. Cette situation est fréquente dans les bâtiments institutionnels tels que les hôpitaux. Le réseau peut prendre la forme de plusieurs postes secondaires interconnectés au moyen de circuits à faible tension. Cependant, la pratique la plus répandue consiste à utiliser une forme de disposition de circuit de réseau ponctuel.

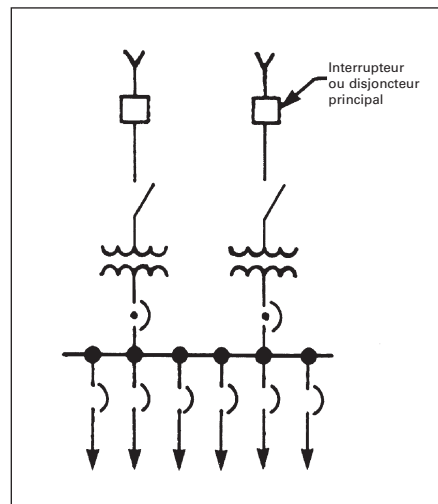


Figure 7. Système à réseau ponctuel simple

Un réseau ponctuel simple, comme celui qui est illustré à la Figure 7, est formé de deux transformateurs identiques ou plus installés sur des circuits d'alimentation principaux distincts. Les transformateurs sont connectés à une barre omnibus basse tension commune

par l'entremise des dispositifs de protection du réseau et sont ouverts en parallèle. Par dispositif de protection du réseau, on entend un disjoncteur à commande électrique contrôlé par relais de réseau de manière à ce que le disjoncteur s'ouvre automatiquement lorsque l'alimentation est acheminée de la barre omnibus à basse tension au transformateur. Lorsque les tensions dans le système sont telles que l'alimentation est acheminée de la barre omnibus à basse tension au transformateur, le dispositif se ferme automatiquement.

Les dispositifs de protection du réseau sont généralement dotés de relais qui fonctionnent uniquement en cas de panne du transformateur du réseau ou du circuit d'alimentation à tension élevée. Le réseau est souvent exploité selon l'hypothèse qu'en cas de défaillance, il s'ouvrira par brûlure.

Les dispositifs de protection du réseau sans protection supplémentaire ne respectent pas les exigences du code national de l'électricité en termes de protection contre les surintensités, les défauts à la terre et les courts-circuits. On peut améliorer la protection du réseau ou de la barre omnibus du collecteur en ajoutant des dispositifs de détection, y compris pour les défauts à la terre, avec déclenchement des dispositifs de protection du réseau. Cependant, l'utilisation la plus fréquente des dispositifs de protection de réseau revient aux sociétés de service public pour les coffres dans lesquels une défaillance des éléments du réseau pourrait occasionner des dommages limités au coffre. Une conception de haute fiabilité alliant une large séparation des phases et l'utilisation de fusibles de « catastrophe » minimise les risques et l'étendue des défaillances du réseau. Un disjoncteur conventionnel doté de dispositifs temporisés de surintensité et à déclenchement instantané, ainsi que de relais de réseau permettent de respecter les exigences du Code national de l'électricité. Cependant, la fiabilité du réseau risque d'être compromise, car la sélectivité est difficile à réaliser entre ces dispositifs.

Dans des conditions normales de fonctionnement, la charge totale connectée à la barre omnibus est répartie également entre les transformateurs. Lorsqu'une panne se produit dans un transformateur ou un circuit d'alimentation principal, le dispositif de protection du réseau associé au transformateur ou au circuit défectueux s'ouvre en mode retour de courant pour isoler la panne de la barre omnibus à basse tension. Les autres transformateurs du poste continuent de porter la charge. Il n'y aura pas d'interruption d'alimentation vers les charges, à l'exception d'une baisse de tension pendant la mise en opération du dispositif de protection.

Si seulement deux transformateurs sont utilisés dans un poste de réseau ponctuel, chacun d'entre eux doit pouvoir porter la charge totale fournie par la barre omnibus à basse tension. La capacité supplémentaire des transformateurs du poste peut être réduite à l'aide d'une disposition

d'interrupteurs à sélection principale au niveau de chaque transformateur, ou en utilisant trois transformateurs ou plus. Lorsqu'une telle disposition d'interrupteurs à sélection principale est utilisée, la charge totale peut atteindre environ 160 pour cent de la valeur nominale indiquée sur la plaque signalétique de l'un des transformateurs. En cas de défaillance d'un circuit d'alimentation principal, cette opération produit une surcharge dans un transformateur jusqu'à ce que l'autre transformateur puisse être commuté vers l'autre circuit d'alimentation.

Le niveau de sectionnement imposé aux dispositifs de protection à faible tension sur un poste de réseau ponctuel est plus élevé que sur les postes radiaux, à sélection principale ou à sélection secondaire qui disposent de la même capacité de charge en raison de la capacité supplémentaire des transformateurs nécessaire sur le poste de réseau ponctuel et parce que les transformateurs sont installés en parallèle.

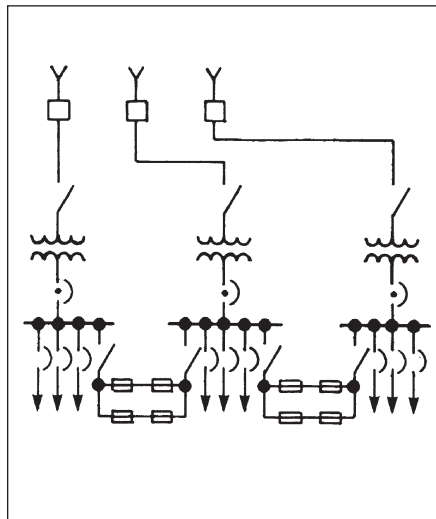


Figure 8. Système à réseau secondaire

La capacité supplémentaire des transformateurs, les dispositifs de protection du réseau et le niveau de sectionnement plus élevé rendent la disposition à réseau secondaire beaucoup plus chère que les autres dispositions. Parallèlement, ces éléments optimisent la fiabilité du système de réseau par rapport aux autres configurations.

Le réseau secondaire peut également prendre la forme présentée à la Figure 8. Cette disposition comporte un seul transformateur dans chaque poste secondaire. Les postes sont interconnectés par des circuits d'attache à faible tension normalement ouverts. Les circuits d'attache permettent l'échange d'alimentation entre les postes pour accommoder une charge inégale sur les postes et fournir plusieurs chemins d'acheminement de l'alimentation vers les diverses barres omnibus des charges. En mode de fonctionnement normal, les postes portent une charge similaire et le courant

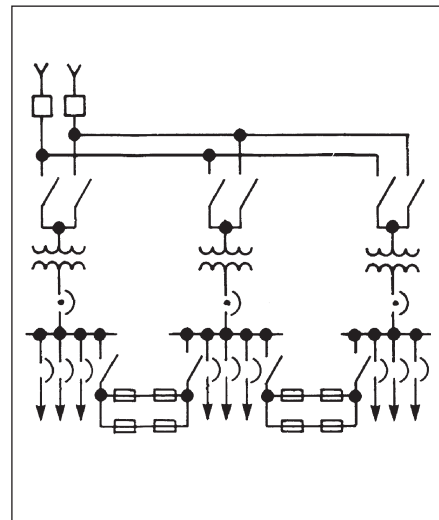


Figure 9. Système de réseau secondaire à sélection principale

qui circule dans les circuits d'attache est relativement faible. Cependant, si un dispositif de protection du réseau s'ouvre pour isoler un transformateur lors d'une panne du circuit d'alimentation principal, la charge de la barre omnibus associée est alors acheminée aux dispositifs du réseau adjacent par l'entremise des circuits d'attache. Cette disposition permet de fournir une alimentation électrique continue à toutes les barres omnibus à basse tension, même si un circuit d'alimentation principal ou un transformateur est mis hors service.

Dans la disposition de réseau de la Figure 9, si on trouve trois circuits d'alimentation principaux et trois transformateurs entrants, la capacité combinée de deux transformateurs devrait suffire pour porter l'intégralité de la charge des trois postes, pourvu qu'un seul circuit d'alimentation soit en panne à la fois. En règle générale, ces transformateurs possèdent les mêmes caractéristiques nominales. À l'instar de la disposition à réseau ponctuel, la présente disposition permet de réduire la capacité supplémentaire des transformateurs, si une disposition d'interrupteurs à sélection principale est utilisée au niveau de chaque transformateur de poste. Toutefois, si trois circuits d'alimentation principaux ou plus sont disponibles, la réduction de la capacité des transformateurs réalisée en utilisant une disposition à sélection principale pourrait être insuffisante.

Pour utiliser des câbles et des barres blindées d'attache, tel qu'illustré aux Figures 8 et 9, il faut porter une attention particulière à la distribution de la charge lors de situations imprévues et aux divers aspects de sécurité à l'égard des retours d'énergie. Un verrouillage des interrupteurs ou des disjoncteurs par clé ou tout autre dispositif mécanique peut s'avérer nécessaire.

Généralités

Un système doit être élaboré convenablement et coordonné de manière à ne pas dépasser la capacité de coupure et/ou de résistance aux courts-circuits des divers composants du système lors de toute situation opérationnelle. Les règles de l'art dictent également que le système doit être sélectif, c'est-à-dire que seule une partie minimale du système doit être interrompue en cas de panne. Il faut toujours trouver un équilibre entre la nécessité d'être sélectif, les impératifs économiques et la coordination des besoins du processus global.

À la phase conceptuelle d'un projet, plusieurs types de systèmes de distribution peuvent être pris en compte et examinés des points de vue technique et économique. Cette étude doit être suffisamment détaillée pour permettre une compréhension approfondie des options de système. L'étude conceptuelle devrait permettre de déterminer la configuration optimale du système de distribution pour le projet; la conception définitive pourra ensuite être réalisée.

À toutes les étapes de la conception, il est essentiel de tenir compte des objectifs fondamentaux que sont la sécurité du personnel, la protection de l'équipement, la continuité des processus, le dépannage et la continuité de l'alimentation.

Lors de la conception d'un nouveau système de distribution ou de la modification d'un système existant, divers types d'études du système peuvent être requis :

- 1. Études des courts-circuits :** les défauts triphasés, ligne à ligne et ligne à terre peuvent être évalués pour des conditions fermer/verrouiller et de coupure, afin de vérifier les consignes des sectionneurs et des dispositifs connexes, et pour installer les dispositifs de protection.
- 2. Études des applications de disjoncteur :** tenir compte des décrets CA et CC du courant de défaut, ainsi que de la vitesse des divers disjoncteurs de moyenne tension, afin d'établir les fonctions fermer/verrouiller et de coupure.
- 3. Études de la coordination des dispositifs de protection :** déterminer les caractéristiques et les réglages des dispositifs de protection, c.-à-d., relais, déclencheurs, fusibles, etc. L'étude de la coordination doit établir un équilibre entre la protection du système et la continuité de l'alimentation.
- 4. Études du débit de puissance :** calculer les tensions, le déphasage, la puissance active et réactive, la charge de ligne et du transformateur lors de simulations pour

aider à déterminer la performance d'un système nouveau ou renouvelé au cours de la phase de planification.

- 5. Études du démarrage de moteurs :** déterminer la gravité des baisses de tension et l'efficacité du couple d'accélération de la charge lors du démarrage de gros moteurs au moyen d'un système faible.

De nos jours, plusieurs de ces études sont réalisées à l'aide de modèles informatiques. Certaines études spécialisées nécessitent des ressources informatiques importantes, mais plusieurs études peuvent désormais être exécutées sur des ordinateurs personnels. Une gamme étendue de progiciels est disponible. En outre, plusieurs firmes spécialisées offrent des services d'ingénierie pour réaliser de telles études.

Calcul des courts-circuits

Le schéma unifilaire constitue le point de départ de l'étude du système et la sélection des consignes de l'équipement. La ligne simple doit être modifiée pour afficher toutes les sources d'alimentation, les capacités et les impédances du système. Les sources de courant de court-circuit comprennent les connexions au réseau électrique, la production locale et toutes les machines rotatives connectées au système au moment de la panne. L'étude du système doit tenir compte des divers types de pannes (ligne à ligne, ligne à terre) et de leur emplacement.

La valeur du courant de charge normal dans un circuit dépend de la charge connectée; elle est essentiellement indépendante de la capacité du réseau électrique. En revanche, le courant de court-circuit dépend en quasi totalité de la capacité du réseau électrique et non de l'importance de la charge.

Le courant de défaut total consiste en une composante CA symétrique, superposée sur une composante CC (décalée). Par conséquent, le courant de défaut total est asymétrique par rapport à l'axe des courants.

La valeur de la composante CC dépend du point de l'onde de tension où le défaut a été initié. Dans le cadre des études du système, nous présumerons que le défaut est initié au pire point, de sorte à produire un courant de défaut entièrement décalé.

Cette situation est illustrée à la Figure 10.

Les courants de court-circuit sont déterminés par l'impédance du système, y compris la réactance et la résistance. La réactance a pour effet d'occasionner un courant de défaut initial élevé, qui diminuera au fil du temps. Cette situation est représentée par la sommation d'une composante CC qui décroît rapidement avec le temps et d'une composante CA qui décroît à un rythme plus lent. La taux de décroissance des composantes dépend du rapport X/R du système.

Puisque la réactance des machines rotatives varie au fil du temps à compter de l'initiation du défaut, les calculs de court-circuit doivent utiliser les bonnes valeurs de réactance de la machine. La réactance subtransitoire (X''_d) régit la circulation du courant pour les six premiers cycles d'un défaut, approximativement. Ensuite, la réactance transitoire (X'_d) détermine la circulation du courant pour 30 à 120 cycles, selon la machine. Par la suite, la réactance synchrone (X_d) s'applique, mais les études emploient rarement cette valeur car, en règle générale, on ne permet pas aux défauts de persister aussi longtemps.

Pour les transformateurs, on utilise la valeur réelle d'essai d'impédance du transformateur. Si cette valeur n'est pas disponible, utilisez l'impédance de conception ajustée à la valeur minimale permise par la tolérance de fabrication de $\pm 7,5\%$. Par exemple, un dispositif de conception de 5,75 % possède une plage de tolérance de 5,32 à 6,18 %, et 5,32 % serait utilisé dans l'étude du système avant la fabrication.

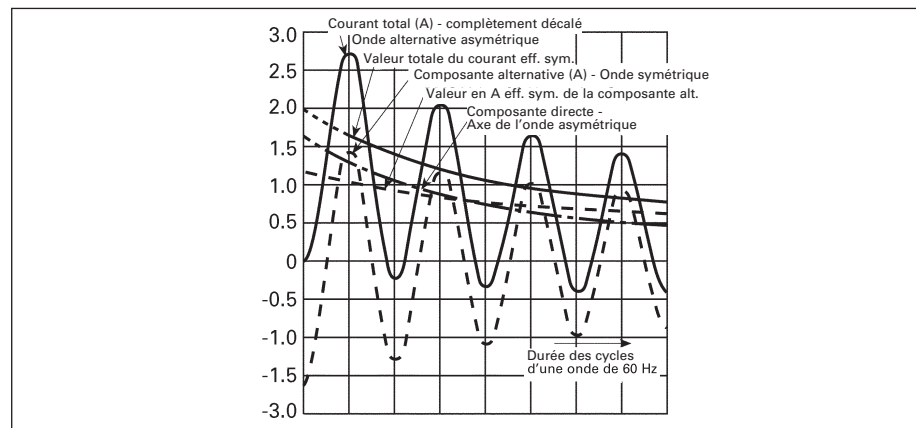


Figure 10. Structure de l'onde de courant asymétrique (entièrement décalée)

Disjoncteurs limiteurs de courant sans fusibles

La technologie des disjoncteurs limiteurs de courant sans fusibles Sentron^{MD} de Siemens a été développée pour répondre aux demandes des systèmes de distribution contemporains. Il n'est pas rare que les nouveaux systèmes aient des courants de court-circuit présumé avoisinant les 200 000 A. Les utilisateurs exigent la protection et la souplesse que procurent les disjoncteurs, mais sans les coûts et la nuisance des remplacements de fusibles.

Un disjoncteur limiteur de courant sans fusibles « n'emploie pas d'élément de fusible et, lorsqu'il fonctionne au sein de sa plage de limitation de courant, limite le courant I^2t laissé passé à une valeur inférieure au I^2t d'une onde de demi-cycle du courant symétrique présumé. »

I^2t est une expression qui permet de comparer l'énergie disponible après la circulation d'un courant de défaut. Dans le cadre des discussions portant sur la limitation de courant, I^2t fait référence à l'énergie libérée entre l'initiation du courant de défaut et l'élimination du défaut du circuit.

La Figure 11 associe le « courant I^2t présumé » à l'énergie permise par un disjoncteur limiteur de courant Sentron ou au « courant I^2t laissé passé ». La courbe supérieure représente le I^2 maximal que peut produire le circuit, sans être altéré par la présence de tout dispositif de protection. La courbe inférieure illustre la réduction de l'énergie permise lorsqu'on utilise des disjoncteurs limiteurs de courant Sentron.

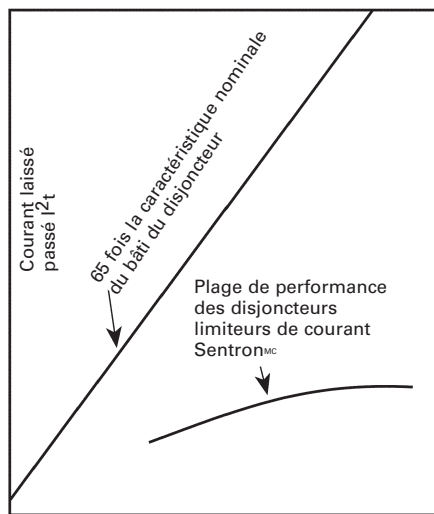


Figure 11. Réduction du courant I^2t laissé passé à l'aide de la technologie de limitation de courant

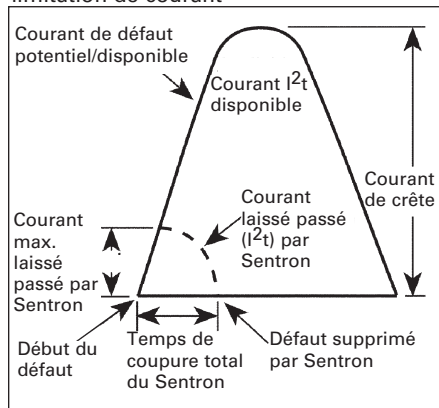


Figure 12. Limitation de courant

La Figure 12 démonte comment le disjoncteur Sentron limite l'énergie lors de conditions de défaut. La courbe supérieure illustre l'onde du premier demi-cycle du courant de défaut présumé. Pour se qualifier comme étant réellement limiteur de courant, un disjoncteur doit empêcher le courant d'atteindre la valeur maximale qu'il atteindrait si le disjoncteur n'était pas connecté au circuit.

Pour limiter le courant, les disjoncteurs Sentron mettent à profit le principe de contact « explosif ». Ce principe repose sur la répulsion électromagnétique des conducteurs adjacents qui acheminent le courant dans des directions opposées.

Les bras de contact sont disposés de manière à établir des champs magnétiques opposés. À mesure que le courant de défaut augmente, la répulsion magnétique force les contacts à se séparer complètement. Plus le courant de défaut est élevé, plus l'action « explosive » se produira rapidement.

Comme l'illustre la Figure 12, le disjoncteur limiteur de courant Sentron réduit grandement l'énergie pouvant passer. L'équipement en aval est mieux protégé et risque moins de subir des dommages.

Applications et valeurs nominales

Les disjoncteurs limiteurs de courant Sentron sont conçus pour être utilisés dans des tableaux de distribution, des panneaux de distribution, des tableaux de contrôle de distribution, des postes de dispositifs secondaires et tous les types de coffrets individuels dans lesquels les courants de défaut disponibles dépassent le pouvoir de coupure des disjoncteurs robustes et extra robustes sous boîtier moulé.

Les disjoncteurs Sentron possèdent des valeurs nominales de 15 à 1 600 A et de 240 à 600 V c.a., avec un pouvoir de coupure allant jusqu'à 200 000 A symétriques.

La coordination d'un système de distribution de l'alimentation nécessite de choisir des dispositifs de protection du circuit et de les régler de manière à ce que les perturbations électriques, telles que les surintensités et les courts-circuits, soient éliminées sans tarder en isolant l'équipement défectueux avec un minimum d'interruptions de l'alimentation du système de distribution. Des courbes caractéristiques temps/courant sont disponibles pour les dispositifs de protection des circuits, tels que les disjoncteurs et les fusibles. Ces courbes démontrent la vitesse à laquelle ces dispositifs se déclencheront à différentes valeurs de courant de surcharge et de court-circuit. La coordination peut être effectuée en comparant ces courbes pour chaque dispositif en série dans le système.

En développant le système, on remarquera qu'il est nécessaire de faire plusieurs compromis entre les divers objectifs :

1. Fiabilité du système.
2. Continuité de l'alimentation.
3. Protection de l'équipement et du système.
4. Coordination des dispositifs de protection.
5. Coût du système.

Étapes préliminaires de l'étude de coordination :

A) Schéma unifilaire : utilisé comme base pour enregistrer les données et les renseignements pertinents à l'égard des relais, des disjoncteurs, des fusibles, des transformateurs de courant et de l'équipement, tout en fournissant une représentation pratique de la relation entre les dispositifs de protection.

B) Étude des courts-circuits : consigne l'ensemble des impédances et valeurs nominales applicables; à l'aide de ces données, l'étude des courts-circuits permet de déterminer les courants disponibles à n'importe quel point particulier du système.

C) Établissement des courants de charge maximaux qui existent dans des conditions normales de fonctionnement dans chaque circuit du système d'alimentation, les courants d'appel qui magnétisent le transformateur, ainsi que la durée, les courants de démarrage et les temps d'accélération de grands moteurs. Ces valeurs caractérisent les courants maximaux que les dispositifs de protection du circuit doivent porter sans se déclencher. La limite supérieure de la sensibilité au courant est déterminée par les plus petites valeurs, compte tenu des considérations suivantes :

- 1) Courant de court-circuit maximal disponible obtenu par calcul.
- 2) Exigences des codes applicables et normes de protection de l'équipement tel que les câbles, les moteurs et les transformateurs.
- 3) Limites thermiques et mécaniques de l'équipement.

D) Courbes caractéristiques temps/courant de tous les dispositifs de protection à coordonner. Pour faciliter l'étude de coordination, ces courbes doivent être réalisées sur du papier de coordination logarithmique standard.

Techniques pour réaliser la coordination :

Le processus de coordination des dispositifs de protection en série consiste essentiellement à sélectionner des dispositifs individuels qui répondent aux exigences particulières d'un circuit ou d'un équipement, puis de tracer les courbes caractéristiques temps/courant de ces dispositifs sur une feuille de papier de coordination logarithmique à superposer.

La coordination nécessite une approche par essais et erreurs dans laquelle les diverses courbes caractéristiques temps/courant des dispositifs en série sont comparées sur le tracé de schéma.

Pour sélectionner des dispositifs de protection, on doit respecter les exigences ANSI et CEC, ainsi que les facteurs limitatifs de la coordination, tels que le courant de charge, le courant de court-circuit et le démarrage du moteur. Les dispositifs de protection sélectionnés doivent fonctionner au sein de ces limites tout en offrant une coordination sélective, dans la mesure du possible. Dans les systèmes à basse tension, on obtient généralement la coordination sélective lorsque le tracé logarithmique des caractéristiques temps/courant donne

un espace clair entre les caractéristiques des dispositifs de protection fonctionnant en série. En d'autres mots, pour obtenir une coordination sélective complète, il doit n'exister aucune superposition entre deux caractéristiques temps/courant. Il faut également tenir compte du dépassement de course du clapet et de la précision de la courbe du fusible. Dans bien des cas, l'étude de coordination sera interrompue juste avant que soit réalisée la coordination sélective complète, car un compromis doit être fait entre certains objectifs concurrents, tels qu'une protection optimale et une continuité d'alimentation maximale.

Coordination assistée par ordinateur :

La philosophie dont nous avons discuté ci-dessus s'applique à la pratique classique qui consiste à procéder à la coordination manuellement. Toutefois, plusieurs logiciels permettent désormais de réaliser facilement les études de coordination.

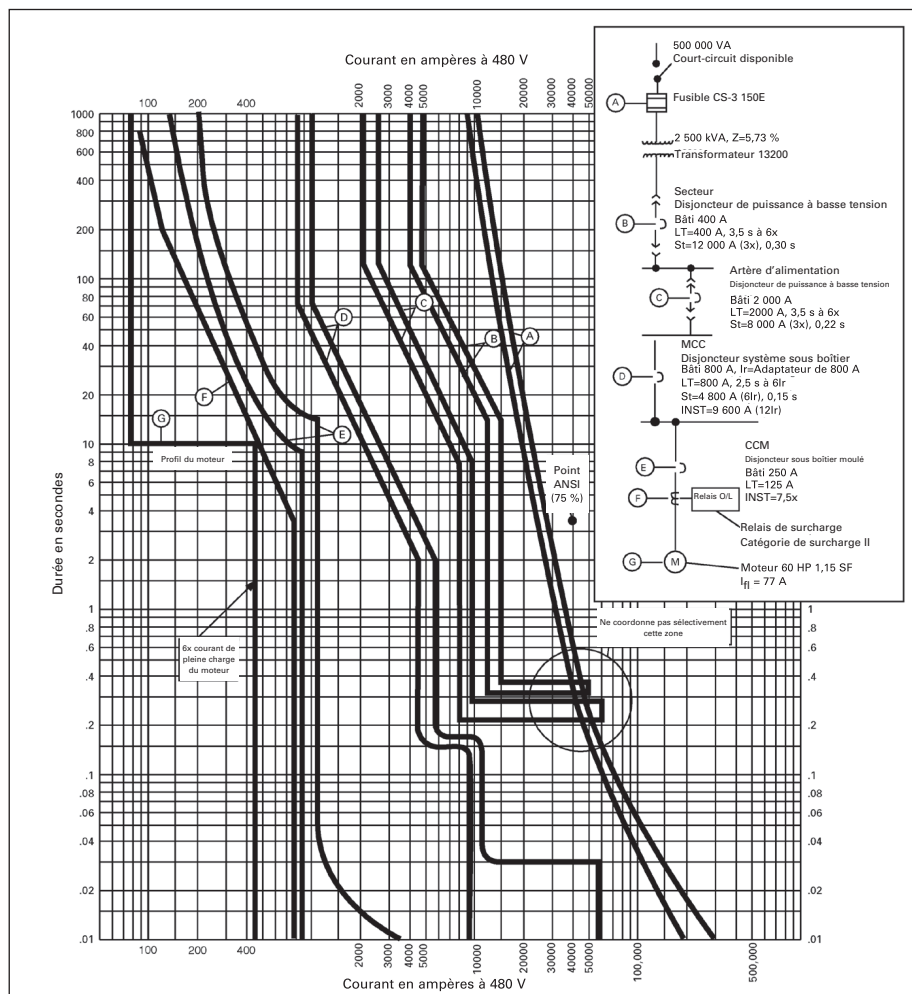


Figure 13. Exemple de coordination de système

Le terme défaut d'arc à la terre « de faible ampleur » est une description trompeuse de cet type de défaut. Cela signifie simplement que l'ampleur du courant de défaut est faible comparativement à celui d'un court-circuit à fond. Malgré cela, l'énergie libérée par l'arc lors du défaut peut provoquer des dommages importants et occasionner un incendie. Par défaut à la terre, s'entend un défaut d'isolement entre un conducteur sous tension et la terre. Contrairement à un court-circuit à fond phase-phase, un arc phase-terre est un défaut à haute impédance. Les facteurs contribuant à cette haute impédance sont la résistance de l'arc et l'impédance du chemin de retour. Cette voie de retour est généralement une conduite métallique, une canalisation, un boîtier de barre blindée ou un bâti de tableau de distribution. Un autre facteur contributif est le caractère épisodique de l'arc. Le disjoncteur ou le fusible qui protège le circuit détecte le courant de défaut, mais l'ampleur réelle du courant de défaut à la terre fluctue constamment en raison des effets de soufflage et d'allongement de l'arc, des tentatives de coupure et du rallumage de l'arc.

Ces effets limitatifs de courant empêchent le disjoncteur ou le fusible de détecter les dommages réels qui se produisent. Cela ne signifie pas que ces dispositifs sont inefficaces. Le problème concerne la protection du système parce que le disjoncteur doit être ajusté (ou la taille du fusible choisie) de sorte à fonctionner sans se déclencher lors de conditions momentanées de surcharge, telles que le courant de démarrage d'un moteur ou le courant d'appel d'un transformateur. Par conséquent, le disjoncteur ou le fusible ne peut s'ouvrir assez rapidement lors de défauts à ampleur relativement basse pour limiter les dommages occasionnés par un arc.

La Figure 14 illustre le problème de base. La figure montre un système de distribution typique avec dispositif de branchement de 1 600 A assorti d'un disjoncteur (une seule ligne « a ») ou un dispositif de protection de l'alimentation à fusibles (une seule ligne « b »). Un défaut à la terre de 1 500 A sur la barre omnibus touchera mais n'ouvrira pas ces dispositifs. Un défaut à la terre de 4 000 A serait éliminé en environ 35 secondes par le disjoncteur et 230 secondes par le fusible. Un défaut de cette ampleur qui persiste pendant une telle période produira un arc doté d'une énergie de plus de 92 000 kW secondes. Des essais ont permis de démontrer qu'un arc avec une énergie de 1 050 kW secondes peut vaporiser environ 1,0 po³ de cuivre ou 2,5 po³ d'aluminium. Il va de soi qu'un défaut de l'ampleur de la Figure 14 provoquera des dommages considérables.

La nature des défauts d'arc à la terre de faible niveau complique leur détection par des dispositifs de protection contre les surintensités traditionnels. Pour protéger complètement le système contre tous les types possibles de défauts, d'autres moyens sont utilisés pour détecter les courants de défaut à la terre, notamment :

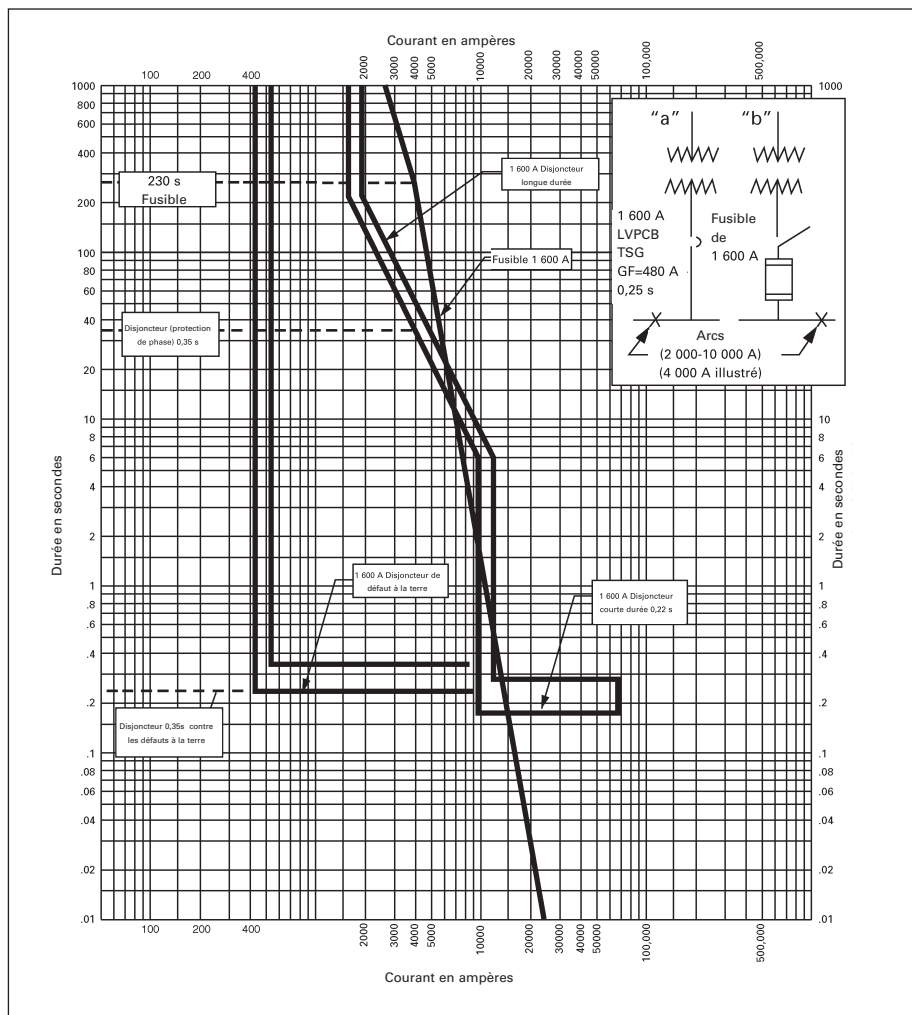


Figure 14. Protection contre les fuites à la terre

- Méthode de courant homopolaire
- Méthode de courant à la terre de la source (ou retour par la terre)
- Méthode de connexion résiduelle

Méthode de courant homopolaire

Cette méthode est généralement utilisée lorsqu'une protection contre les défauts à la terre est fournie pour l'équipement employant des déclencheurs électromécaniques. Ce modèle utilise un transformateur à courant cumulé (capteur de défaut à la terre) qui entoure tous les conducteurs de phase (et le neutre sur les systèmes à quatre fils) pour détecter les défauts à la terre.

Dans des conditions normales de fonctionnement (c.-à-d. pas de défaut à la terre), il n'y a pas de courant entre le capteur de défaut à la terre et le relais de déclenchement parce que la somme vectorielle de tous les courants au niveau de la fenêtre du capteur est nulle.

$$(I_a + I_b + I_c + I_n = 0)$$

Si le système subit un défaut à la terre,

le capteur de défaut à la terre détecte un courant supplémentaire (I_g) qui retourne à la source par un chemin différent que la fenêtre du capteur. Le capteur détecte maintenant un déséquilibre occasionné par I_g et active le relais de terre qui déclenche le dispositif de protection du circuit.

$$(I_a + I_b + I_c + I_n = I_g)$$

Le capteur de défaut à la terre se situe en aval du point de mise à la terre du système et peut être installé du côté ligne ou du côté charge du sectionneur principal. Cette méthode est utilisée pour le sectionneur principal entrant ou les circuits d'alimentation.

Méthode de courant à la terre de la source (ou retour par la terre)

Cette méthode de détection du courant de défaut à la terre I_g repère le capteur de défaut à la terre au niveau de la connexion du neutre à la terre du circuit de branchement. Ainsi, le capteur de défaut à la terre ne détecte que le courant de défaut à la terre. Ce type de détection comporte certaines limites, car il détecte le courant de retour de défaut à la terre. Dans des systèmes à sources multiples dotés de plusieurs connexions à la terre, ce courant de défaut à la terre peut retourner par plusieurs chemins. Par conséquent, on perdra une certaine sensibilité de détection de ces défauts.

Méthode de connexion résiduelle

Des capteurs de courant, à savoir un par conducteur de phase et conducteur neutre, sont connectés en commun. Cette connexion commune (ou résiduelle) mesure la somme vectorielle des courants de phase et du courant de neutre. Dans des conditions normales, cette somme vectorielle est nulle et aucun courant n'est appliqué au relais de terre.

Si un défaut à la terre se produit, la somme des courants ne sera pas nulle. Le courant circule dans la connexion commune qui est appliquée au relais. Cette méthode de détection du courant de défaut à la terre est utilisée pour les disjoncteurs assortis d'un déclencheur électronique.

Détection du courant de défaut à la terre résiduel

Système à trois fils

Ce système est utilisé avec des déclencheurs électroniques et comprend toujours trois capteurs de courant installés sur le disjoncteur. Le déclencheur est connecté en série avec chaque capteur pour fournir une protection contre la surintensité de phase. En ajoutant un déclencheur de défaut à la terre au circuit résiduel (neutre) des trois capteurs de courant, on ne détectera que le courant de défaut à la terre, et non le courant de charge. Des réglages plus sensibles pourront ainsi offrir une protection contre les défauts à la terre de faible ampleur. Cette situation est illustrée à la Figure 18.

Dans des conditions normales, la somme vectorielle des courants de toutes les phases est nulle. Aucun courant ne circule dans le déclencheur de défaut à la terre, ni en cas de défaut phase à phase.

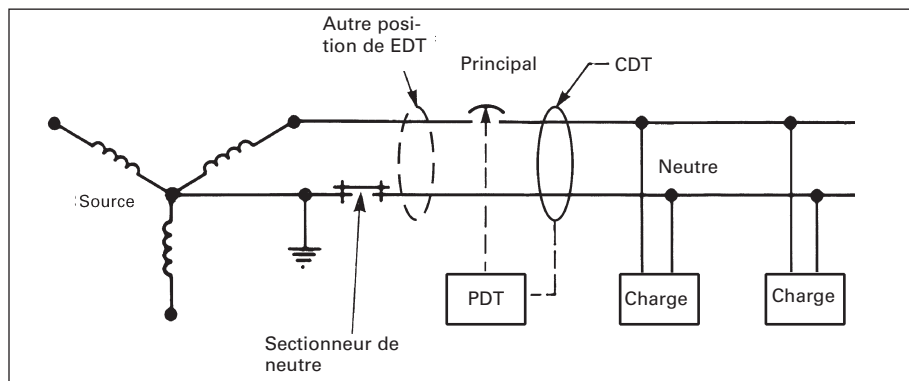


Figure 15. Schéma pour le courant homopolaire

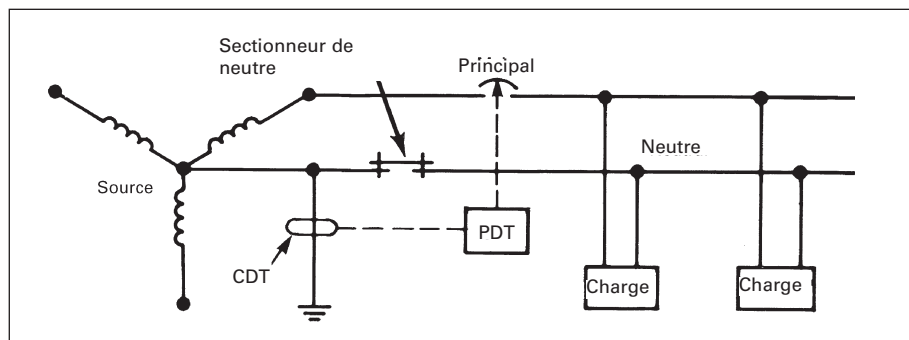


Figure 16. Schéma pour le courant à la terre de la source

CDT = Capteur de défaut à la terre
PDT = Protection contre les défauts à la terre (relais ou déclencheur)

Un défaut phase à terre fait circuler un courant dans le déclencheur de défaut à la terre. Lorsque l'ampleur de ce courant dépasse la consigne de mise en marche pour la période établie, le déclencheur active le disjoncteur.

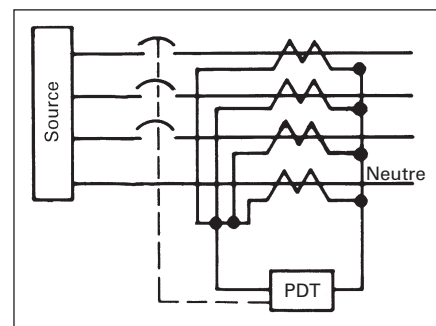


Figure 17. Schéma pour la méthode résiduelle

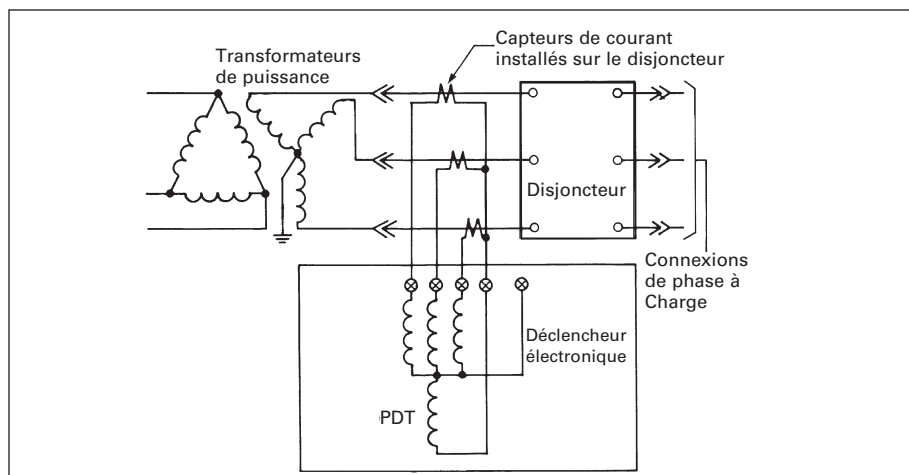


Figure 18. Schéma pour la protection contre les défauts à la terre d'un système à trois fils, avec détection résiduelle

Système à quatre fils

Pour éviter les déclenchements intempestifs, un quatrième capteur de courant est connecté au conducteur neutre pour détecter le courant de neutre normal. Ce quatrième capteur est connecté de manière à annuler le courant de neutre normal qui est développé dans le circuit résiduel, tel qu'illustré à la Figure 19.

Dans des conditions normales, la somme vectorielle des courants de toutes les phases est égale au courant de neutre. Sans égard aux effets de la connexion du capteur neutre, le courant de neutre circule dans le déclencheur de défaut à la terre. Puisque ce courant de neutre est normal, la mise en marche du déclencheur de défaut à la terre n'est pas souhaitée. Par conséquent, le capteur neutre est ajouté pour détecter le même courant de neutre que le capteur de défaut à la terre, mais d'une polarité inverse. On obtient un courant qui circule entre les capteurs de courant détecteurs de phase et le capteur neutre. En outre, aucun courant ne circule dans le capteur de défaut à la terre. Cette situation s'apparente à un circuit de relais différentiel. En cas de défaut phase à terre, la somme vectorielle des courants de phase n'est plus égale au courant de neutre, car le courant de défaut à la terre retourne par l'entremise de la barre de mise à la terre en évitant le neutre. Lorsque l'ampleur du

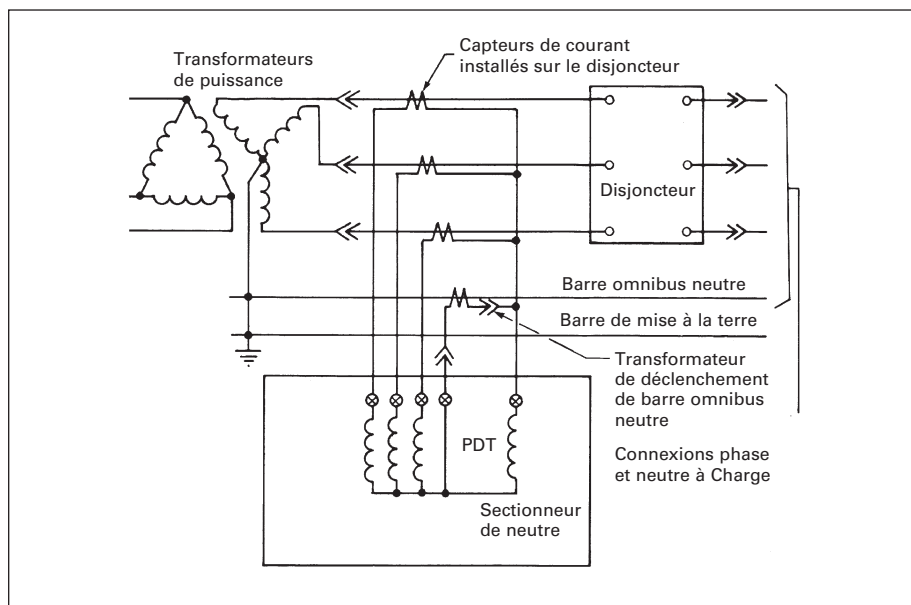


Figure 19. Schéma pour la protection contre les défauts à la terre d'un système à quatre fils, avec détection résiduelle

Le courant phase à terre dépasse la consigne de mise en marche du déclencheur de défaut à la terre pour la période établie, le déclencheur active le disjoncteur.

Types de systèmes coordonnés de protection contre les défauts à la terre

Il existe deux types de systèmes coordonnés de défaut à la terre :

- **Sélection du temps/courant**
- **Sélection de la zone (verrouillage de zone)**

Sélection du temps/courant

Dans ce système, les caractéristiques temps/courant des dispositifs de protection contre les défauts à la terre utilisés avec chaque sectionneur sont coordonnés pour que le sectionneur le plus près de l'emplacement du défaut à la terre s'ouvre. Les sectionneurs en amont restent fermés et continuent d'acheminer le courant de charge. Chaque ensemble de dispositifs de protection contre les défauts à la terre doit posséder des caractéristiques de fonctionnement temps/courant spécifiées. Lorsque les sectionneurs sont connectés en série, chaque dispositif en aval doit utiliser des consignes temps/courant qui forceront son ouverture et libéreront le circuit avant l'activation de tout sectionneur en amont. Les plages temps/courant des sectionneurs en série ne doivent pas se superposer et doivent être suffisamment séparées l'une de l'autre pour permettre la période de coupure nécessaire à chaque mode de déconnexion utilisé. Le système à sélection temps/courant est recommandé pour les applications où les niveaux de dommage associés aux consignes temps/courant sont tolérables. Ce type de système ne nécessite pas de câblage de verrouillage entre les dispositifs de protection contre les

défauts à la terre associés aux sectionneurs des circuits d'alimentation et secondaire.

La Figure 20, à la page suivante, illustre la coordination à sélection temps/courant dans un système comportant un disjoncteur principal de 4 000 A et un disjoncteur de circuit d'alimentation de 1 600 A dans un tableau de contrôle d'alimentation entrant. Ce système alimente un tableau de contrôle de distribution doté d'un circuit d'alimentation secondaire de 600 A et d'un disjoncteur de dérivation de 100 A. Le système est coordonné pour que le disjoncteur le plus près du défaut à la terre se déclenche.

Sélection de la zone (verrouillage de zone)

Dans ce système, chaque dispositif sectionneur doit s'ouvrir aussi rapidement que possible lorsqu'un défaut à la terre se produit dans la zone où se trouve la source d'alimentation la plus près.

Le dispositif de protection contre les défauts à la terre d'un dispositif sectionneur en amont doit avoir au moins deux modes de fonctionnement. Si un défaut à la terre se produit entre celui-ci et le sectionneur en aval le plus près, il doit fonctionner en mode de déclenchement rapide.

Lorsqu'un défaut à la terre se produit au-delà du sectionneur en aval, le dispositif de protection contre les défauts à la terre en aval doit s'ouvrir en mode de déclenchement rapide et envoyer simultanément un signal d'interruption au dispositif en amont, puis activer ce dispositif en mode de

déclenchement temporisé. La caractéristique de temporisation sélectionnée du dispositif en amont doit permettre au sectionneur en aval de s'ouvrir et de libérer le circuit avant que le mécanisme sectionneur en amont ne soit activé. La caractéristique temps/courant du dispositif en aval doit faire office de protection de secours en cas de défaillance de l'équipement en aval.

De plus, un signal d'interruption en provenance d'un dispositif en aval peut être utilisé pour empêcher le déclenchement d'un sectionneur en amont en cas de défaut à la terre, plutôt que de le faire fonctionner en mode de déclenchement temporisé. Cette opération peut être effectuée lorsque la protection de secours est moins importante que la continuité de l'alimentation aux charges critiques fournie par le dispositif en amont. Puisqu'on ne peut justifier cette opération qu'en de rares instances, on doit réaliser une étude approfondie de l'intégralité du système avant d'utiliser ce type de verrouillage.

Dans un système à sélection de zone, les plages temps/courant des sectionneurs en série, bien qu'ils n'assurent qu'une protection de secours, ne doivent pas se superposer et doivent être suffisamment séparées l'une de l'autre pour permettre la période d'ouverture nécessaire à chaque mode de déconnexion utilisé.

Système coordonné de protection contre les défauts à la terre à sélection temps/courant

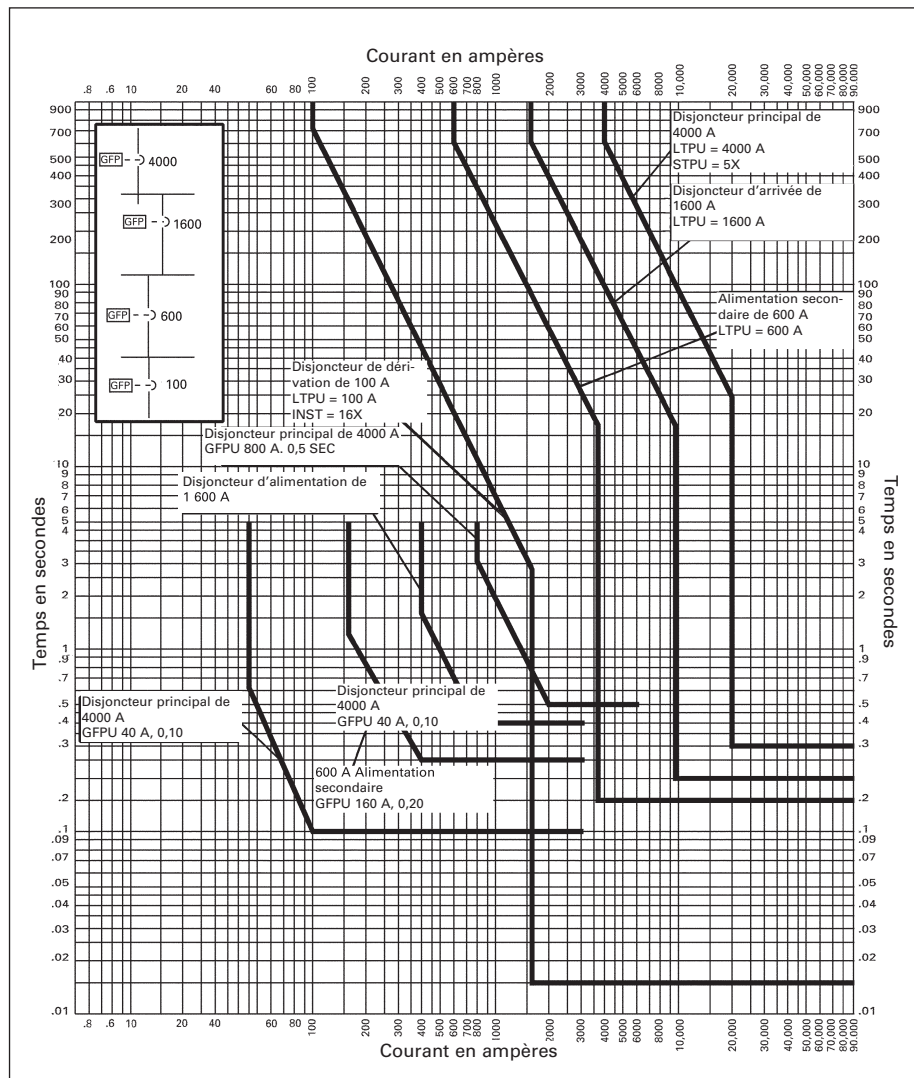


Figure 20. Système entièrement coordonné de protection contre les défauts à la terre

Le système à sélection de zone ou à verrouillage de zone permet de déclencher rapidement le prochain sectionneur en amont du défaut à la terre. Les dommages sont restreints au minimum parce que le défaut à la terre est supprimé dès que le dispositif de protection peut répondre et que le sectionneur s'ouvre. Il est nécessaire d'employer du câblage de verrouillage supplémentaire ainsi que des circuits pour envoyer et recevoir les signaux d'interruption.

Le modèle à sélection de zone ou à verrouillage de zone est utilisé pour certaines applications spéciales où un déclenchement exceptionnellement rapide est nécessaire dans tous les

circuits d'alimentation à l'échelle du système pour réduire les dommages. Bien qu'il soit possible de réduire significativement la durée de transmission, il faudra toujours tenir compte du temps de déclenchement du mécanisme du disjoncteur et de la durée d'arc (plus une marge de sécurité).

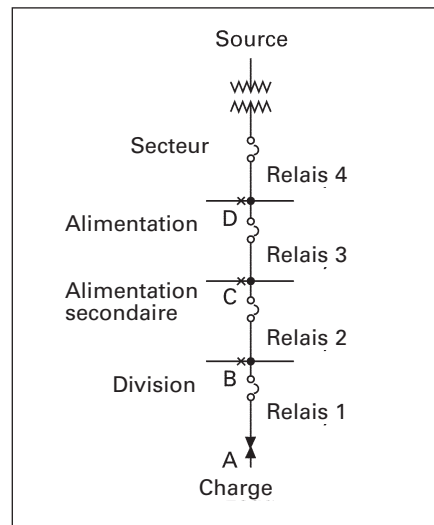


Figure 21. Modèle de verrouillage de zone

Fonctionnement à sélection de zone (Figure 21) :

- Le relais -1** capte un défaut à la terre au point **A** lorsqu'il dépasse 10 A. Il déclenche instantanément le disjoncteur **de dérivation**, puis envoie un signal d'interruption (transfert du mode instantané au mode temporisé) au **relais -2** et au **relais -3** (les relais -2 et -3 prendront la relève du relais 1 sur une base de temps coordonné). **Le relais -4** sera interrompu par le **relais -2** si le défaut à la terre dépasse 100 A.
- Le relais -2** capte un défaut à la terre au point **B** lorsqu'il dépasse 100 A. Il déclenche instantanément le disjoncteur **d'alimentation secondaire**, puis envoie un signal d'interruption au **relais -3** et au **relais -4**.
- Le relais -3** capte un défaut à la terre au point **C** lorsqu'il dépasse 400 ampères. Il déclenche instantanément le disjoncteur **d'alimentation**, puis envoie un signal d'interruption au **relais -4**.
- Le relais -4** capte un défaut à la terre au point **D** lorsqu'il dépasse 800 ampères. Il déclenche instantanément le **disjoncteur principal**.

Tableau A.1

Intensité nominale typique	Temporisation limitée
800	0.4 SEC.
400	0.3 SEC.
100	0.2 SEC.
10	0.1 SEC.

Schémas d'application standard

Les Figures 22 à 27 de la présente page et des pages suivantes illustrent les méthodes de base pour l'installation de dispositifs de protection contre les défauts à la terre. Pour d'autres types de systèmes de distribution, il peut s'avérer nécessaire d'adapter ces méthodes pour répondre aux conditions différentes. Ces schémas affichent les disjoncteurs

sous forme de sectionneurs. N'importe quel moyen de déconnexion peut être utilisé, pourvu qu'il s'adapte au système de protection contre les défauts à la terre, tel qu'indiqué dans la portée du présent guide d'application. Les exemples n'illustrent pas la protection contre les défauts à la terre du côté alimentation du sectionneur principal. L'emplacement des capteurs et des sectionneurs détermine les zones de

protection. Les capteurs des côtés source et retour par la terre ne protègent que le côté charge des sectionneurs associés. Si une méthode de somme vectorielle est utilisée et que ces capteurs sont installés du côté charge d'un sectionneur, la responsabilité de la zone entre une source et l'emplacement réel du capteur repose sur le prochain dispositif de protection en amont.

Tableau A.2 Recommandation pour les figures 22-27

Protection contre les défauts à la terre	Figure	Méthode de détection	Points de mise à la terre supplémentaires	Utilisation recommandée	Sélectivité
Sur sectionneur principal seulement	22	Somme vectorielle	Ne doit pas être en aval. Peut être en amont.	Protection minimale conformément à la Section 230-95 du Code national de l'électricité	La sélectivité limitée dépend de l'emplacement des dispositifs de protection contre les défauts et de la consigne des dispositifs limiteurs de surintensité en amont du défaut.
	23	Retour par la terre	Aucun		
Sur les sectionneurs principal et d'alimentation	24	Sectionneurs principal et d'alimentation - Somme vectorielle	Doit être en aval du capteur principal de défaut à la terre. Peut être en amont.	Une continuité d'alimentation supérieure est nécessaire.	Le sectionneur principal permet au sectionneur d'alimentation de se déclencher en cas de défaut en aval des capteurs d'alimentation. Toutefois, le sectionneur principal se déclenchera si le sectionneur d'alimentation ne fonctionne pas.
	25	Sectionneur principal - Retour par la terre - Sectionneurs d'alimentation - Somme vectorielle	Aucun		
Sur les sectionneurs principal, d'alimentation et divisionnaires sélectionnés avec verrouillage sélectif de zone"	26	Sectionneur principal et d'alimentation 1-3 - Somme vectorielle	Doit être en aval du capteur principal de défaut à la terre. Peut être en amont.	Une continuité d'alimentation supérieure et un minimum de dommages occasionnés par les arcs s'imposent. Une protection peut également s'avérer nécessaire sur les circuits divisionnaires.	MCC divisionnaire d'alimentation A - Courant homopolaire les sectionneurs principal et d'alimentation 1-3 fournissent une protection de secours temporisée si un défaut se trouve en aval du disjoncteur d'alimentation divisionnaire MCC A. Le disjoncteur principal offre une protection de secours temporisée si le défaut est en aval des capteurs des sectionneurs d'alimentation 1-3. Le sectionneur principal se déclenche selon la courbe la plus rapide si le défaut est en amont des capteurs des sectionneurs d'alimentation 1-3.
Système double avec protection sur les sectionneurs principal, d'attache et d'alimentation	27	Sectionneur principal et d'attache - Retour par la terre	Aucun	Systèmes doubles avec protection contre les défauts à la terre sur le sectionneur d'attache lorsqu'une continuité maximale de l'alimentation est essentielle.	Sectionneurs d'alimentation - Somme vectorielle En cas de fonctionnement avec le sectionneur d'attache ouvert, le sectionneur principal offre une protection de secours temporisée si le défaut est en aval des capteurs des sectionneurs d'alimentation. Lors du fonctionnement avec le sectionneur d'attache fermé, ce dernier se déclenche avant le sectionneur principal et sectionne la barre omnibus.

Protection contre les défauts à la terre sur le sectionneur principal seulement

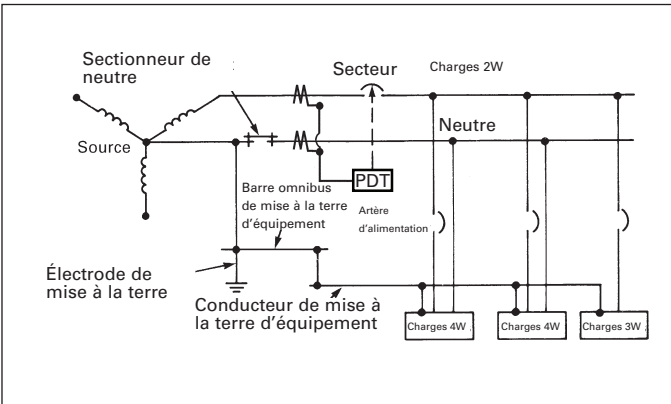


Figure 22

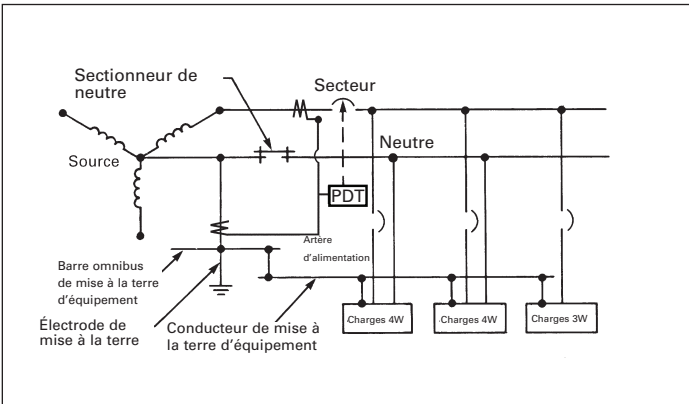


Figure 23

Protection contre les défauts à la terre sur les sectionneurs principal et d'alimentation

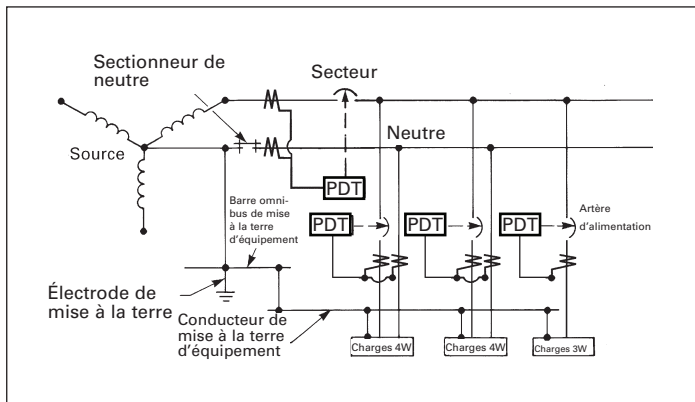


Figure 24

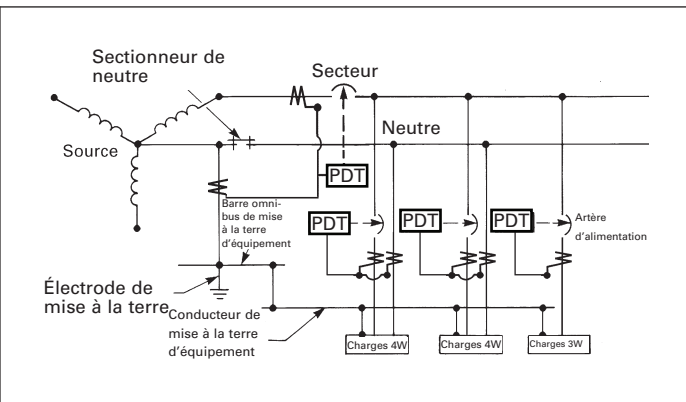


Figure 25

Protection contre les défauts à la terre sur les sectionneurs principal, d'alimentation et de dérivation sélectionnés avec verrouillage sélectif de zone

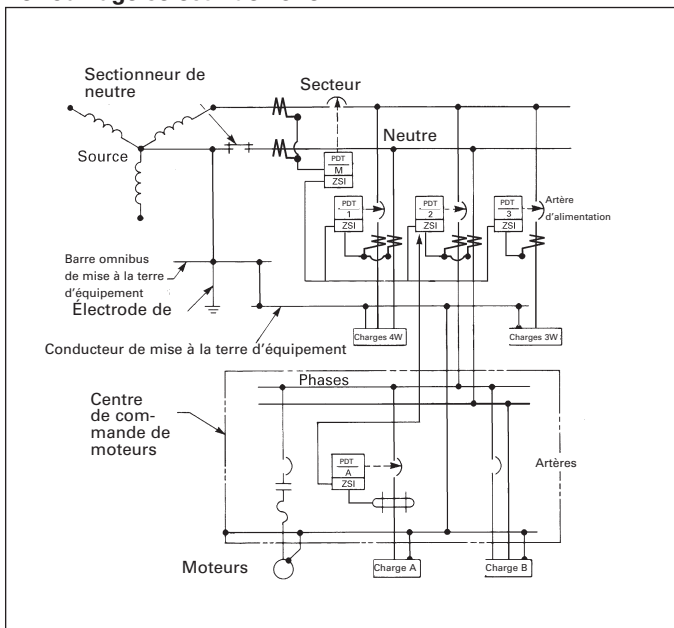


Figure 26

Système double avec protection contre les défauts à la terre sur les sectionneurs principal, d'attache et d'alimentation

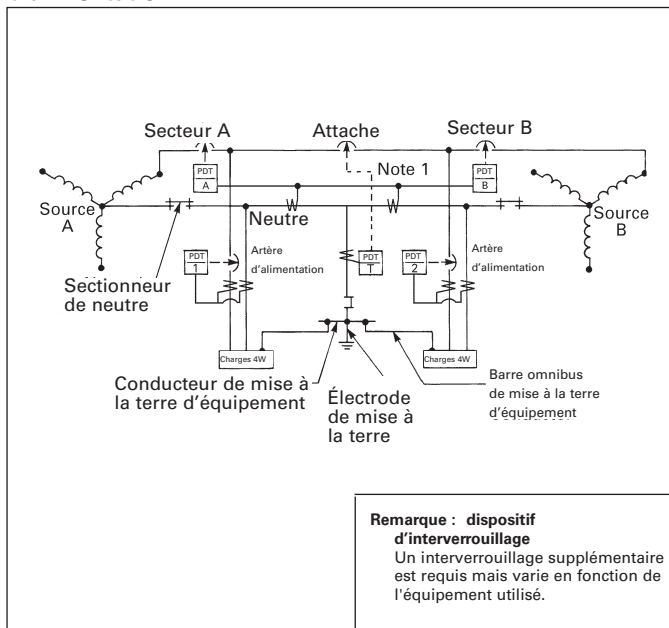


Figure 27

Remarque : dispositif d'interverrouillage
Un interverrouillage supplémentaire est requis mais varie en fonction de l'équipement utilisé.

Valeur nominale de connexion série

Une valeur nominale de connexion série peut être attribuée à une combinaison de composants, généralement des disjoncteurs. Cette valeur a été testée conjointement avec une valeur nominale d'interruption plus élevée que la consigne du dispositif de protection le plus faible de la combinaison. Ces valeurs nominales doivent être corroborées par des essais exhaustifs de la CSA.

Généralités

L'équipement conçu pour interrompre le courant aux niveaux de défaut doivent posséder un pouvoir de coupure égal ou supérieur à la tension nominale du circuit et au courant disponible aux bornes de ligne de l'équipement. L'équipement conçu pour interrompre le courant à des valeurs différentes des niveaux de défaut doit posséder un pouvoir de coupure à la tension nominale égal ou supérieur au courant à interrompre.

La différence entre les termes « aux niveaux de défaut » et « à des valeurs différentes des niveaux de défaut » est la partie du Code qui rend possible les systèmes connectés en série. Par exemple, la méthode traditionnelle permettant de satisfaire le Code consiste à sélectionner chaque disjoncteur de la série avec un pouvoir de coupure égal ou supérieur au courant de défaut potentiel. Le pouvoir de coupure d'un disjoncteur, exprimé en ampères efficaces symétriques, représente la quantité de courant de court-circuit que le dispositif peut interrompre de façon sécuritaire tout en continuant de fonctionner comme disjoncteur.

Par conséquent, si le courant de défaut potentiel au niveau des bornes de ligne d'un panneau de distribution est de 100 000 A eff. symétriques, cette méthode traditionnelle nécessitera que tous les disjoncteurs du panneau aient un pouvoir de coupure nominal de 100 000 A eff.

symétriques ou plus. Cette situation est illustrée à la Figure 28. Dans le système traditionnel, les disjoncteurs principal et de circuit d'alimentation sont assujettis à plusieurs crêtes de court-circuit. En revanche, dans un système connecté en série, les composants individuels (ou disjoncteurs) *ont déjà été testés en série et la combinaison s'est vue attribuer un pouvoir de coupure égal ou supérieur aux divers courants de défaut potentiels*. Par conséquent, la combinaison agit comme une *seule entité* et exécute les mêmes fonctions de protection que les disjoncteurs individuels dans la méthode traditionnelle. La différence est que les systèmes connectés en série contiennent des dispositifs avec un pouvoir de coupure inférieur.

Les disjoncteurs Siemens utilisés dans des combinaisons série ont réussi les essais exhaustifs requis par la CSA.

Dans l'exemple précédent, si le courant de défaut potentiel au niveau des bornes de ligne du panneau de distribution est de 100 000 A efficaces symétriques, la méthode de connexion en série implique de sélectionner une *combinaison* spécifique avec un pouvoir de coupure nominal de 100 000 A efficaces symétriques ou supérieur. Cette combinaison pourrait inclure des composants dont le pouvoir de coupure nominal individuel est inférieur à 100 000 A efficaces symétriques.

Cependant, tous les composants de la combinaison ont été testés ensemble et forment une entité pouvant interrompre de façon sécuritaire le courant de défaut potentiel de la situation particulière étudiée, pourvu que le pouvoir de coupure indiqué corresponde au courant de défaut potentiel. L'arrivée des disjoncteurs limiteurs de courant sans fusibles tels que Sentron a donné lieu à une autre percée importante pour les combinaisons connectées en série. La capacité d'interruption

extrêmement rapide de ces disjoncteurs limiteurs de courant sans fusibles offre davantage de contrôle sur les courants de défaut potentiels élevés que les systèmes connectés en série traditionnels.

Le concept que sous-tend l'utilisation des disjoncteurs limiteurs de courant sans fusibles comme composants d'un système connecté en série comporte deux volets : (1) des pouvoirs de coupure plus élevés, et (2) une augmentation du contrôle sur le courant de crête (i_p) et l'énergie pouvant passer (I^2t).

Par exemple, on place un disjoncteur limiteur de courant du côté le plus près de la source d'alimentation, lequel comporte une valeur nominale conforme au courant de défaut potentiel au niveau des bornes de ligne. On place ainsi un « voile de protection » sur les composants en aval. En raison du pouvoir de coupure élevé inhérent au disjoncteur limiteur de courant, le courant de court-circuit potentiel ne pose aucun problème. De plus, grâce à l'action de limitation de courant, le courant I^2t potentiel n'atteint jamais les composants en aval. Cette situation est illustrée à la Figure 29.

Il est important de reconnaître que le disjoncteur limiteur de courant est un composant individuel devant faire partie des combinaisons testées par la CSA, et que cette combinaison — disjoncteur limiteur de courant et d'autres disjoncteurs — forme l'entité spécifiée dans les applications quotidiennes.

Pour connaître les combinaisons connectées en série spécifiques qui respectent les exigences de la CSA, veuillez vous reporter à la section des disjoncteurs du présent catalogue ou communiquer avec votre bureau des ventes Siemens.

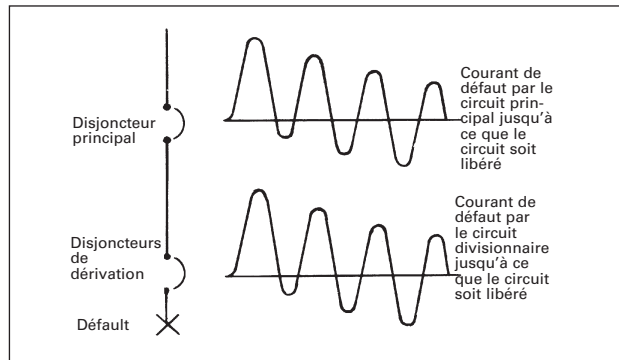


Figure 28 — Sans limitation de courant

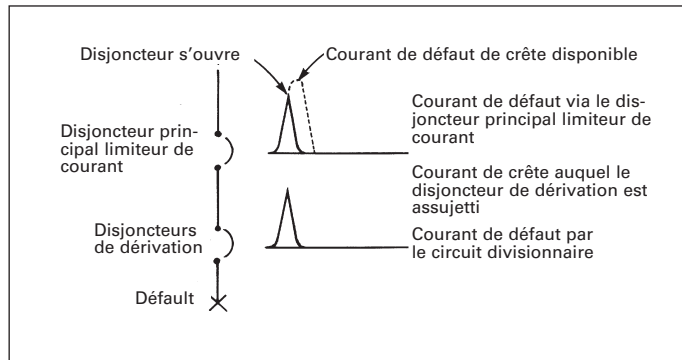


Figure 29 — Modèle de protection à connexion en série avec disjoncteur principal limiteur de courant

Données techniques

Valeurs nominales des harmoniques / du coefficient K

Sélection

Charges non linéaires

Lorsqu'une tension sinusoïdale est appliquée à une charge linéaire, l'onde de courant résultante prend également la forme d'une onde sinusoïdale. À titre de charge linéaires typiques, citons le chauffage ohmique et les moteurs asynchrones.

En revanche, une charge non linéaire :

- Tire du courant uniquement pendant une partie du cycle et fonctionne comme un circuit ouvert pour le reste du cycle;
- ou
- Change l'impédance pendant le cycle; ainsi la forme d'onde résultante est déformée et n'est plus purement sinusoïdale

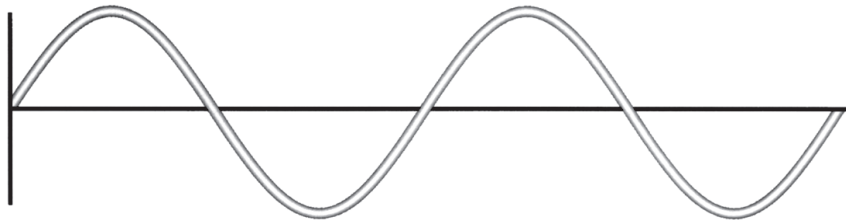
Au cours des dernières années, l'utilisation d'équipement électronique a proliféré autant dans les bureaux que les usines. Ces dispositifs électroniques fonctionnent à l'aide d'une alimentation à découpage ou d'un type quelconque de circuit de redressement. Voici quelques exemples d'appareils utilisés dans les bureaux : ordinateurs, télécopieurs, photocopieurs, imprimantes, caisses enregistreuses, systèmes d'alimentation sans coupure et ballasts à semi-conducteurs. Dans les usines industrielles, on trouve d'autres dispositifs électroniques tels que des entraînements à vitesse variable, des lampes à décharge à haute intensité, des démarreurs à semi-conducteurs et des instruments à semi-conducteurs. Ces appareils contribuent tous à la distorsion de la forme d'onde du courant et à la génération d'harmoniques. Puisque l'utilisation des appareils électroniques augmente sans cesse et s'approprie une grande partie de la charge électrique, plusieurs experts s'inquiètent de l'impact sur le système d'alimentation électrique.

Harmoniques

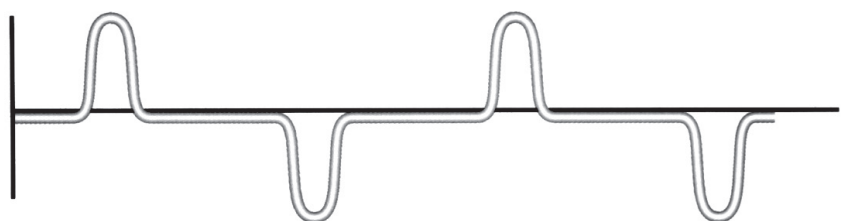
Telles que définies par la norme ANSI / IEEE 519-1992, les composants harmoniques sont représentés par une onde ou une quantité périodique dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence fondamentale. Les harmoniques sont des tensions ou des courants dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale (60 Hz) : 120 Hz, 180 Hz, 240 Hz, 300 Hz, etc. Les harmoniques sont représentées par leur rang d'harmonique ou un multiple de leur fréquence fondamentale. Ainsi, on appelle une harmonique assortie d'une fréquence de 180 Hz (trois fois la fréquence fondamentale de 60 Hz), une harmonique de rang 3.

Les harmoniques se superposent sur la forme d'onde fondamentale, la déformant et changent son amplitude. Par exemple, lorsqu'une source de tension à onde sinusoïdale est appliquée à une charge non linéaire reliée à partir d'une branche phase au neutre sur un circuit triphasé à quatre fils, la charge elle-même débite une onde de courant formée de la fréquence fondamentale de 60 Hz provenant de la source de tension, en plus d'harmoniques impaires de rang 3 ou supérieur (multiples de la fréquence

Tension pour la forme d'onde de courant des charges linéaires (onde sinusoïdale)



Forme d'onde typique de la source d'alimentation d'interruption



Courant non linéaire et son onde fondamentale, avec composants harmoniques de rangs 3 et 5

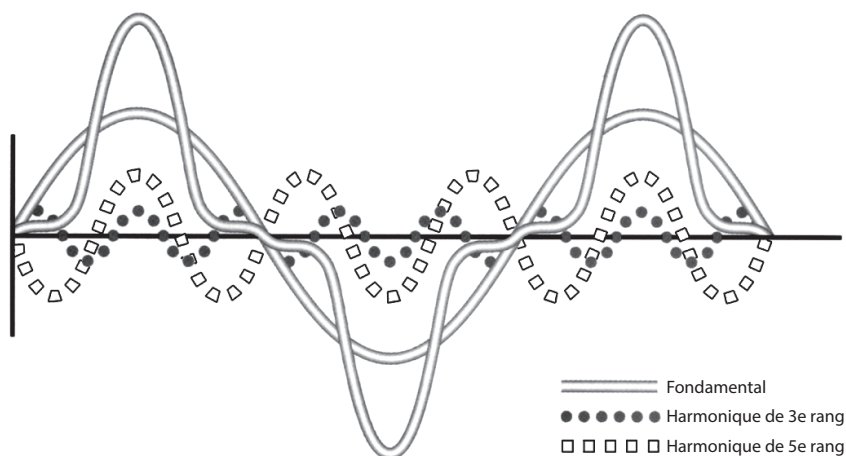


Figure 30 — Effet des harmoniques sur la forme d'onde de courant

fondamentale de 60 Hz), lesquelles sont toutes générées par la charge non linéaire. Pour déterminer le taux d'harmoniques, on calcule la racine carrée de la somme des carrés de toutes les harmoniques que l'on divise par la fréquence normale (60 Hz).

$$THD = \sqrt{\frac{\left(\frac{I_{RMS}}{60 \text{ Hz}}\right)^2 + \left(\frac{I_{RMS}}{180 \text{ Hz}}\right)^2 + \left(\frac{I_{RMS}}{N}\right)^2}{\left(\frac{I_{RMS}}{60 \text{ Hz}}\right)^2}}$$

On obtient une valeur efficace de la distorsion sous forme de pourcentage de la forme d'onde fondamentale de 60 Hz.

Par conséquent, le pourcentage des harmoniques impaires (3^e, 5^e, 7^e, ..., 25^e, ...) présentes dans la charge peut affecter le transformateur. On appelle cette condition une charge non linéaire ou encore une charge non sinusoïdale. Pour déterminer la quantité de contenu harmonique, on calcule le coefficient K plutôt que le taux d'harmoniques. La quantité totale d'harmoniques présentes détermine le pourcentage de la charge non linéaire, que l'on peut spécifier avec le coefficient K approprié.

Données techniques

Valeurs nominales des harmoniques / du coefficient K

Sélection

Symptômes typiques des problèmes d'harmoniques

- Surchauffe des transformateurs de distribution/d'éclairage même lorsque le courant de charge mesuré respecte la valeur nominale du transformateur
- Surchauffe du câble neutre/de la barre omnibus même avec une charge équilibrée
- Rupture des fusibles et déclenchement des disjoncteurs à des courants non nominaux

Effet des harmoniques sur les transformateurs

Un courant non sinusoïdal génère des pertes et un chauffage excédentaires dans les bobines des transformateurs, ce qui réduit l'efficacité et la durée de vie du transformateur. La bobine subissent davantage de pertes en présence de fréquences harmoniques plus élevées, en raison des pertes par courant de Foucault plus importantes dans les conducteurs.

De plus, dans un réseau électrique linéaire équilibré, les courants de phase sont déphasés de 120 degrés et décalés l'un par rapport à l'autre dans le conducteur neutre. Toutefois, avec les harmoniques de rang 3 (multiple de 3), les courants de phase ne sont pas déphasés et se combinent dans le conducteur neutre. Ce phénomène peut forcer des installations dotées de charges non linéaires à doubler la taille ou le nombre des conducteurs neutres.

Mesure des harmoniques

Tableau A.3 Coefficient K

Type	Charge linéaire	Charge non linéaire	Soupage de charge à coefficient K
K4	100 %	50 %	4,0
K13	100 %	100 %	13,0
K20	100 %	125 %	20,0
K30	100 %	150 %	30,0

Pour les installations existantes, l'étendue des harmoniques peut être mesurée à l'aide d'instruments appropriés que l'on appelle communément « Analyseur de puissance des harmoniques ». Ce service est offert par diverses organisations de services conseils. Pour une nouvelle construction, il se peut que cette information ne soit pas disponible. Dans de telles situations, il est préférable de présumer des pires conditions

imaginables en fonction de votre expérience avec ce type de charges et leur application combinée.

Sélection de transformateurs pour des charges non linéaires

La norme ANSI / IEEE C57.110-2008 propose une procédure de déclassement des transformateurs de distribution standard pour les charges non linéaires. Il ne s'agit pas cependant de la seule approche. Un transformateur avec un coefficient K convenable conçu spécifiquement pour les charges non linéaires peut être spécifié.

Coefficients K

Le coefficient K est un rapport entre les pertes supplémentaires occasionnées par les harmoniques et les courants de Foucault à 60 Hz. Il aide à choisir des transformateurs pour les charges non linéaires. Il est à noter que les transformateurs à coefficient K n'éliminent pas la distorsion harmonique; ils résistent aux conditions de charge non linéaire sans surchauffer.

Calcul des charges à coefficient K

1. Dressez la liste de la valeur kVA pour chaque catégorie de charges à fournir. Ensuite, attribuez une désignation de coefficient K qui correspond au niveau relatif des harmoniques prélevées par chaque type de charge. Reportez-vous au Tableau A.4.

2. Multipliez le kVA de chaque charge ou catégorie de charges par le coefficient K d'indice de charge (I_{LK}) qui correspond au coefficient K attribué. On obtient alors une valeur $kVA-I_{LK}$ indexée.

$$KVA \times I_{LK} = kVA-I_{LK}$$

3. Comptabilisez la charge connectée totale en kVA pour toutes les catégories de charges à fournir.
4. Ensuite, additionnez les valeurs $kVA-I_{LK}$ de toutes les charges ou catégories de charges s que le transformateur devra fournir.
5. Divisez la valeur du total général de $kVA-I_{LK}$ par la charge kVA totale à fournir. On obtient alors un I_{LK} moyen pour cette combinaison de charges.
 $kVA-I_{LK} \text{ total} / kVA \text{ total} = I_{LK} \text{ moyen}$.
6. Dans le Tableau A.4, trouvez le coefficient K dont le I_{LK} est égal ou supérieur au I_{LK} calculé.

Tableau A.4 Estimation des charges à coefficient K^①

Description	Coefficient K	I_{LK}
Éclairage incandescent Chauffage par résistance électrique Moteurs (sans entraînement à semi-conducteurs) Transformateurs de contrôle/dispositifs de contrôle électromagnétique Groupes électrogènes (sans entraînement à semi-conducteurs) Transformateurs de distribution standard	K1	0,00
Éclairage à décharge électrique (HID) UPS avec filtre d'entrée facultatif Soudeuses Appareil de chauffage par induction PLC et contrôles à semi-conducteurs	K4	25,82
Équipement de télécommunications (PBX) UPS sans filtre d'entrée Circuits « prise de courant » à plusieurs fils dans les zones de soins généraux des établissements de santé, le écoles, etc. Circuits « prise de courant » à plusieurs fils alimentant l'équipement d'essai sur une ligne d'assemblage	K13	57,74
Charges d'ordinateur central Moteurs avec entraînement à semi-conducteurs (entraînement à vitesse variable) Circuits « prise de courant » à plusieurs fils alimentant les zones critiques des hôpitaux	K20	80,94
Circuits « prise de courant » à plusieurs fils dans les laboratoires industriels, médicaux et pédagogiques Circuits « prise de courant » à plusieurs fils dans les espaces de bureau Petits ordinateurs centraux (mini et micro)	K30	123,54

① Charges typiques et valeurs de coefficient K pour estimation seulement

Tableau 1A

Courants de pleine charge de moteurs CA triphasés à induction^①

Puissance nominale du moteur (HP)	Courant en ampères			
	208 V	230 V	460 V	575 V
1/4	1,11	0,96	0,48	0,38
1/3	1,34	1,18	0,59	0,47
1/2	2,4	2,2	1,1	0,9
3/4	3,5	3,2	1,6	1,3
1	4,6	4,2	2,1	1,7
1 1/2	6,6	6	3	2,4
2	7,5	6,8	3,4	2,7
3	10,6	9,6	4,8	3,9
5	16,7	15,2	7,6	6,1
7 1/2	24,2	22,0	11,0	9,0
10	30,8	28,0	14,0	11,0
15	46,2	42,0	21,0	17,0
20	59,4	54	27	22
25	74,8	68	34	27
30	88	80	40	32
40	114	104	52	41
50	143	130	65	52
60	169	154	77	62
75	211	192	96	77
100	273	248	124	99
125	343	312	156	125
150	396	360	180	144
200	528	480	240	192
250	—	—	302	242
300	—	—	361	289
350	—	—	414	336
400	—	—	477	382
450	—	—	515	412
500	—	—	590	472

Tableau 1B

Courants de pleine charge (A) de moteurs CA monophasés

Puissance (HP)	115 V	230 V
1/6	4,4	2,2
1/4	5,8	2,9
1/3	7,2	3,6
1/2	9,8	4,9
1/3	13,8	6,9
1	16	8
1 1/2	20	10
2	24	12
3	34	17
5	56	28
7 1/2	80	40
10	100	50

Tableau 1C

Courants de pleine charge (A) de moteurs CC

Puissance (HP)	120 V	240 V
1/4	3,1	1,6
1/3	4,1	2,0
1/2	5,4	2,7
3/4	7,6	3,8
1	9,5	4,7
1 1/2	13,2	6,6
2	17	8,5
3	25	12,2
5	40	20
7 1/2	58	29
10	76	38

Tableau 2

Formules électriques pour calculer l'intensité en ampères, la puissance en kilowatts et la consigne kVA

Pour calculer	Monophasé	Courant alternatif diphasé ^① , quatre fils	Triphasé	Courant continu
Kilowatts	$\frac{I \times E \times fp}{1\,000}$	$\frac{I \times E \times 2 \times fp}{1\,000}$	$\frac{I \times E \times 1,73 \times fp}{1\,000}$	$\frac{I \times E}{1\,000}$
kVA	$\frac{I \times E}{1\,000}$	$\frac{I \times E \times 2}{1\,000}$	$\frac{I \times E \times 1,73}{1\,000}$	—
Puissance (sortie)	$\frac{I \times E \times \% \text{ EFF} \times fp}{746}$	$\frac{I \times E \times 2 \times \% \text{ EFF} \times fp}{746}$	$\frac{I \times E \times 1,73 \times \% \text{ EFF} \times fp}{746}$	$\frac{I \times E \times \% \text{ EFF}}{746}$
Ampères lorsque la puissance est connue	$\frac{HP \times 746}{E \times \% \text{ EFF} \times fp}$	$\frac{HP \times 746}{2 \times E \times \% \text{ EFF} \times fp}$	$\frac{HP \times 746}{1,73 \times E \times \% \text{ EFF} \times fp}$	$\frac{HP \times 746}{E \times \% \text{ EFF}}$
Ampères lorsque les Kilowatts sont connus	$\frac{KW \times 1\,000}{E \times fp}$	$\frac{KW \times 1\,000}{2 \times E \times fp}$	$\frac{KW \times 1\,000}{1,73 \times E \times fp}$	$\frac{KW \times 1\,000}{E}$
Ampères lorsque kVA est connu	$\frac{kVA \times 1\,000}{E}$	$\frac{kVA \times 1\,000}{2 \times E}$	$\frac{kVA \times 1\,000}{1,73 \times E}$	—

Efficacité moyenne et facteur de puissance des moteurs

Lorsqu'on ne connaît pas les efficacités et les facteurs de puissance réels des moteurs à contrôler, on peut utiliser les approximations suivantes.

Efficacités :

Moteurs CC, 35 HP et moins 80 % à 85 %

Moteurs CC, plus de 35 HP 85 % à 90 %

Moteurs synchrones (à un facteur de puissance de 100 %) 92 % à 95 %

Efficacités apparentes

(= efficacité x facteur de puissance);

Moteurs à induction triphasés, 25 HP et moins 85 %

Moteurs à induction triphasés plus de 25 HP 90 %

Ces valeurs peuvent être réduites légèrement pour des moteurs à induction monophasés et biphasés.

Calcul du courant de défaut pour les systèmes CA à basse tension

Pour déterminer les pouvoirs de coupure maximaux des disjoncteurs d'un système de distribution, il faut calculer le courant qui circule dans des conditions de court-circuit à fond d'un système triphasé. Dans un système triphasé, le courant de défaut maximal du côté secondaire du transformateur peut être calculé au moyen de cette formule :

$$I_{sc} = \frac{kVA \times 100}{KV \times \sqrt{3} \times \% Z}$$

où :

I_{sc} = Ampères eff. symétriques du courant de défaut.

kVA = Consigne kilovolt-ampère des transformateurs.

KV = Tension secondaire en kilovolts.

% Z = Impédance exprimée en pourcentage de la ligne et du transformateur principaux.

Le Tableau 5 de la page 15-4 dresse la liste des courants de défaut efficaces symétriques disponibles aux bornes secondaires du transformateur.

Fractions, décimales et équivalents en millimètres

Tableaux de conversion

Fractions, décimales et millimètres

Fractions	Décimales	Millimètres
1/64	0,015625	0,397
1/32	0,03125	0,794
3/64	0,046875	1,191
1/16	0,0625	1,588
5/64	0,078125	1,984
3/32	0,09375	2,381
7/64	0,109375	2,778
1/8	0,1250	3,175
9/64	0,140625	3,572
5/32	0,15625	3,969
11/64	0,171875	4,366
3/16	0,1875	4,763
13/64	0,203125	5,159
7/32	0,21875	5,556
15/64	0,234375	5,953
1/4	0,2500	6,350
17/64	0,265625	6,747
9/32	0,28125	7,144
19/64	0,296875	7,541
5/16	0,3125	7,938
21/64	0,328125	8,334
11/32	0,34375	8,731
23/64	0,359375	9,128
3/8	0,3750	9,525
25/64	0,390625	9,922
13/32	0,40625	10,319
27/64	0,421875	10,716
7/16	0,4375	11,113
29/64	0,453125	11,509
15/32	0,46875	11,906
31/64	0,484375	12,303
1/2	0,500	12,700
33/64	0,515625	13,097
17/32	0,53125	13,494
35/64	0,546875	13,891
9/16	0,5625	14,288
37/64	0,578125	14,684
19/32	0,59375	15,081
39/64	0,609375	15,478
5/8	0,6250	15,875
41/64	0,640625	16,272
21/32	0,65625	16,669
43/64	0,671875	17,066
11/16	0,6875	17,463
45/64	0,703125	17,859
23/32	0,71875	18,256
47/64	0,734375	18,653
3/4	0,7500	19,050
49/64	0,765625	19,447
25/32	0,78125	19,844
51/64	0,796875	20,241
13/16	0,8125	20,638
53/64	0,828125	21,034
27/32	0,84375	21,431
55/64	0,859375	21,828
7/8	0,8750	22,225
57/64	0,890625	22,622
29/32	0,90625	23,019
59/64	0,921875	23,416
15/16	0,9375	23,813
61/64	0,953125	24,209
31/32	0,96875	24,606
63/64	0,984375	25,003
1	1,000	25,400

Millimètres et pouces^①

Millimètres	Pouces	Millimètres	Pouces
0.1	0,0039	46	1,8110
0.2	0,0079	47	1,8504
0.3	0,0118	48	1,8898
0.4	0,0157	49	1,9291
0.5	0,0197	50	1,9685
0.6	0,0236	51	2,0079
0.7	0,0276	52	2,0472
0.8	0,0315	53	2,0866
0.9	0,0354	54	2,1260
		55	2,1654
1	0,0394	56	2,2047
2	0,0787	57	2,2441
3	0,1181	58	2,2835
4	0,1575	59	2,3228
5	0,1969	60	2,3622
6	0,2362	61	2,4016
7	0,2756	62	2,4409
8	0,3150	63	2,4803
9	0,3543	64	2,5197
10	0,3937	65	2,5591
11	0,4331	66	2,5984
12	0,4724	67	2,6378
13	0,5118	68	2,6772
14	0,5512	69	2,7165
15	0,5906	70	2,7559
16	0,6299	71	2,7953
17	0,6693	72	2,8346
18	0,7087	73	2,8740
19	0,7480	74	2,9134
20	0,7874	75	2,9528
21	0,8268	76	2,9921
22	0,8661	77	3,0315
23	0,9055	78	3,0709
24	0,9449	79	3,1102
25	0,9843	80	3,1496
26	1,0236	81	3,1890
27	1,0630	82	3,2283
28	1,1024	83	3,2677
29	1,1417	84	3,3071
30	1,1811	85	3,3465
31	1,2205	86	3,3858
32	1,2598	87	3,4252
33	1,2992	88	3,4646
34	1,3386	89	3,5039
35	1,3780	90	3,5433
36	1,4173	91	3,5827
37	1,4567	92	3,6220
38	1,4961	93	3,6614
39	1,5354	94	3,7008
40	1,5748	95	3,7402
41	1,6142	96	3,7795
42	1,6535	97	3,8189
43	1,6929	98	3,8583
44	1,7323	99	3,8976
45	1,7717	100	3,9370

① 0,001 po = 0,0254 mm
1 mm = 0,03937 po

Notes
