

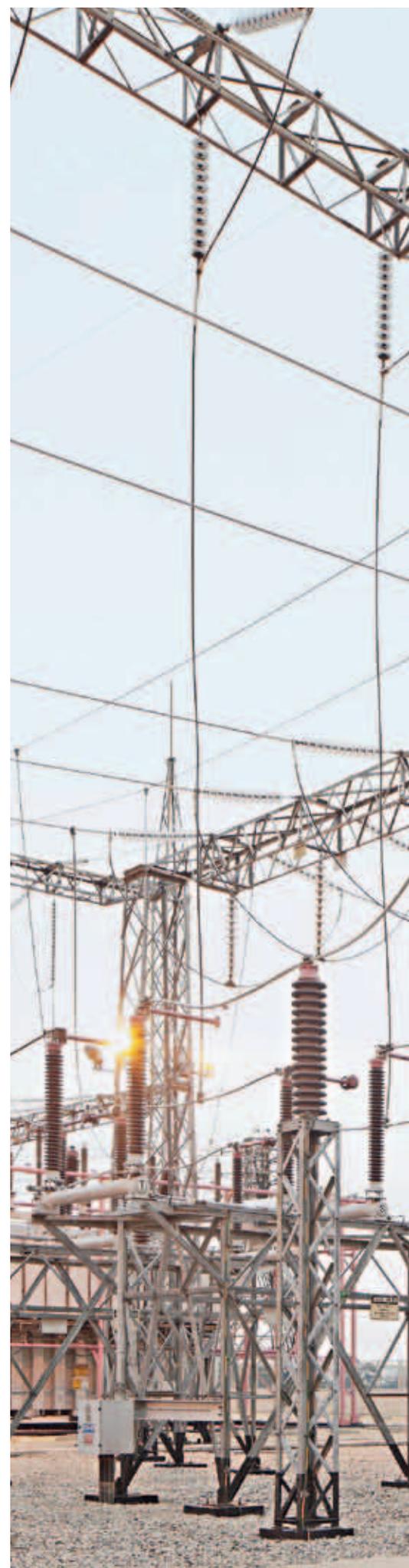
Comportement modèle

Modéliser la distribution électrique pour optimiser le réglage de tension et de puissance réactive sur les réseaux du futur

TIM TAYLOR – Confrontés aux exigences croissantes d'efficacité et de gestion des pointes de consommation, les distributeurs électriques doivent évaluer de nouvelles stratégies de pilotage pour mieux exploiter le réseau et éviter de mobiliser d'onéreux moyens de production supplémentaires. Parmi celles-ci, l'optimisation du réglage de tension et de puissance réactive « VVO » (*Volt and Var Optimization*) connaît un regain d'intérêt, à la suite de nouveaux développements technologiques. Elle inclut la réduction de la tension de conservation, qui consiste à abaisser la tension de fonctionnement en certains points de charge du client pour réduire la demande électrique (généralement, de l'ordre de 2 à 4 %). Elle permet également de minimiser les pertes en gérant mieux les dispositifs compensateurs de puissance réactive. Ces stratégies s'appuient sur un modèle qui, dans le système de gestion de la distribution « DMS » (*Distribution Management System*), reproduit en dynamique l'état fonctionnel du réseau et tient ainsi compte des pannes et des reconfigurations, par exemple : c'est la « VVO par modèle ». Sa commercialisation, associée au déploiement de la supervision SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) et des dispositifs électroniques intelligents « IED » (*Intelligent Electronic Devices*), procure d'énormes gains de performance aux distributeurs tout en réduisant la demande, les pertes de puissance active et les coûts d'exploitation.

Photo

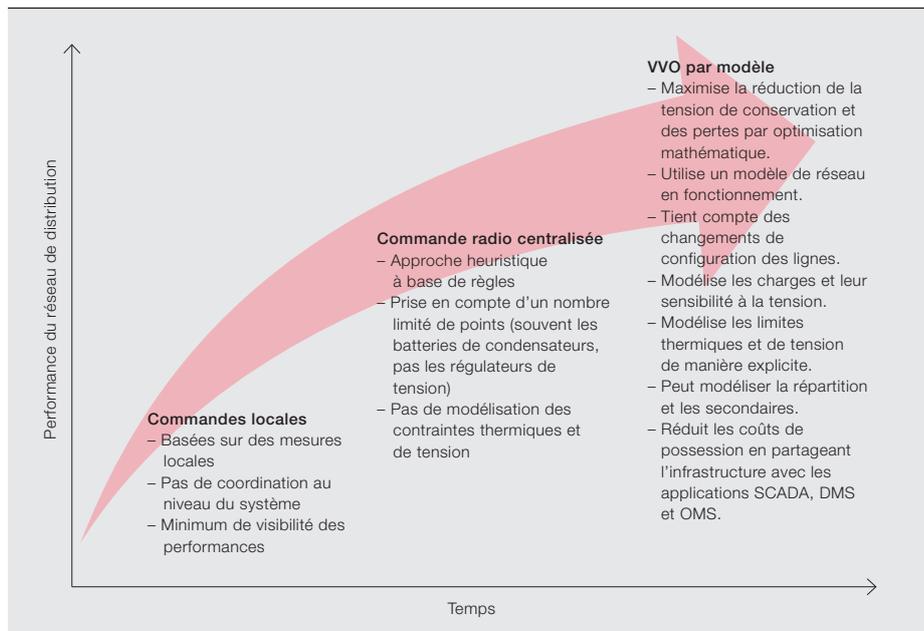
Comment la modélisation dynamique de la distribution électrique peut-elle contribuer à l'essor du réseau intelligent et à la réduction des coûts ?





Un modèle dynamique pour optimiser le réglage de tension et de puissance réactive présente l'avantage de toujours tenir compte de l'état du réseau en fonctionnement.

1 Principales évolutions du réglage de tension et de puissance réactive



L'importance grandissante de l'efficacité énergétique et l'obligation de gérer les pics de consommation ravivent l'intérêt des distributeurs pour la réduction de la tension de conservation.

La VVO par modèle associe un modèle de fonctionnement dynamique du réseau de distribution et un algorithme mathématique rigoureux d'optimisation pour atteindre un objectif d'exploitation donné. Elle utilise un modèle de connectivité du réseau, tiré du système d'information géographique (SIG) de l'entreprise. L'état fonctionnel des composants du système, dans le modèle

jours tenir compte de l'état du réseau en fonctionnement. C'est la garantie que les prises des régulateurs de tension et des transformateurs régleurs en charge, de même que l'état d'enclenchement des condensateurs commutés reflètent en temps réel la configuration effective du système.

Les économies dégagées par le report des nouveaux investissements de production ainsi que par la réduction des achats de capacités, des pertes, de la consommation énergétique, des coûts d'exploitation et de maintenance justifient amplement l'optimisation VVO

par modèle dans les réseaux électriques du futur.

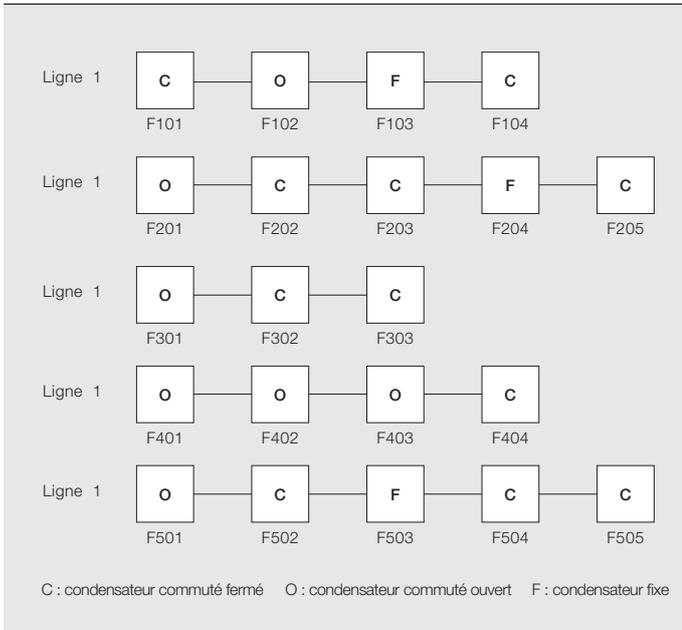
Les limitations techniques inhérentes aux précédentes méthodes de pilotage de la tension et des flux de puissance

Une fois en place, l'infrastructure et les moyens nécessaires à la VVO par modèle peuvent être mis à profit pour assurer des fonctions supplémentaires.

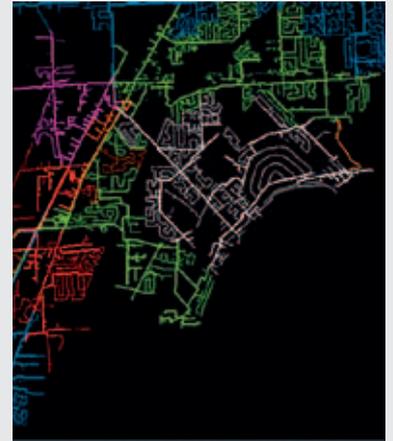
de réseau, est habituellement modifié soit directement par l'opérateur de conduite, soit par le biais d'une interface SCADA qui rapatrie les changements d'état des disjoncteurs de distribution, interrupteurs, réenclencheurs, fusibles, jonctions et appareils de coupure, etc.

L'emploi d'un modèle dynamique pour optimiser le réglage de tension et de puissance réactive a l'avantage de tou-

réactive (commandes locales et systèmes radio centralisés unidirectionnels) ne permettaient pas une optimisation systématique des réglages pour maximiser la réduction des pertes et de la tension de conservation. De plus, elles nécessitaient des serveurs supplémentaires et une infrastructure de communication qui s'avère aujourd'hui inadaptée aux nouvelles fonctionnalités du système électrique (localisation des défauts,



- Modèle électrique du réseau de distribution (triphase, non équilibré) : impédances et capacités.
- Modélisation des charges des clients : % impédance par rapport à % puissance constante et limites de tension.
- Optimisation de l'état des condensateurs et des régleurs de prises par itérations du transit de puissance.
- Prise en compte du réseau de distribution en fonctionnement.



auto-cicatrisation, surveillance et pilotage *intelligents* de toute la distribution).

Antécédents

Depuis l'apparition des premiers réseaux de distribution, à la fin du XIX^e siècle, beaucoup d'efforts ont été accomplis pour contrer les effets de la puissance réactive et des chutes de tension. Des actionneurs de réglage (régulateurs de tension, transformateurs régleurs en charge et batteries de condensateurs fixes et commutés) furent développés pour aider à maintenir la tension des clients dans les limites réglementaires, à libérer les capacités de production, de transport et de distribution, et à réduire les pertes de puissance active.

Les premiers mécanismes de réglage de ces dispositifs prenaient la forme de commandes locales consistant notamment en des mesures directes de courant et de tension sur les régulateurs et changeurs de prises, mais aussi indirectes (temps, température, etc.) sur les condensateurs commutés, celles-ci servant souvent de valeurs « intermédiaires » pour déterminer le flux de courant réactif réel → 1.

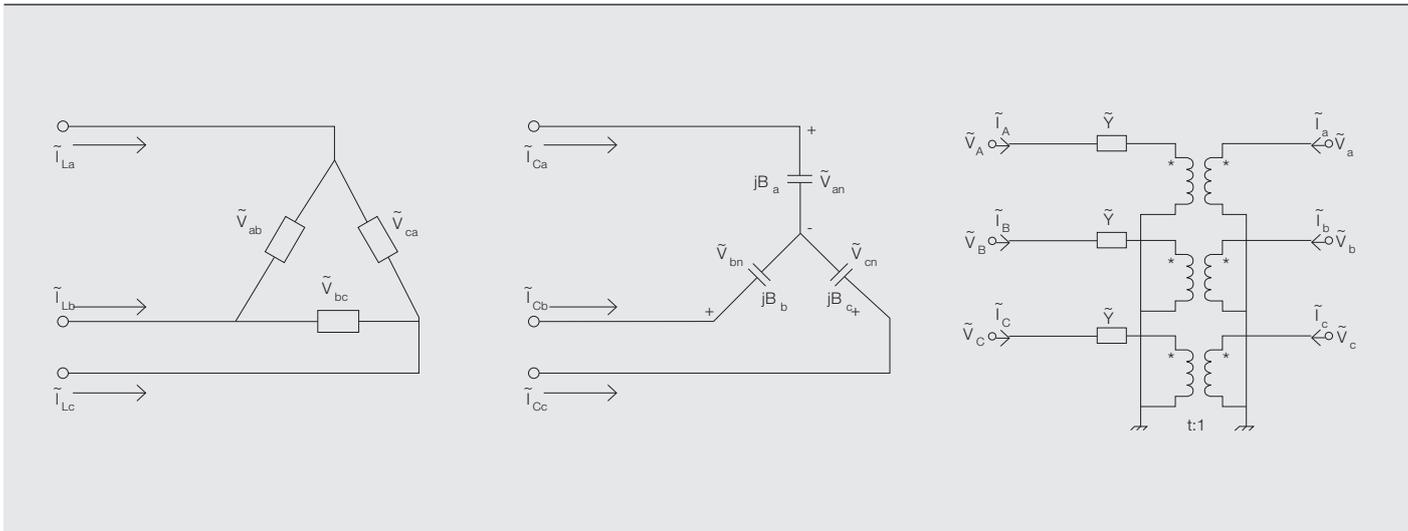
Malheureusement, qui dit commandes locales implique l'absence de coordination centralisée des équipements au niveau du système; la réduction de la tension de conservation est alors loin d'être optimale. À cela s'ajoutent les frais de déplacement d'agents pour vérifier sur

place les fusibles, s'assurer du bon fonctionnement des commandes ou modifier les réglages en fonction des variations saisonnières de consommation.

Si des batteries de condensateurs ne fonctionnent pas ou sont mal réglées, la tension peut atteindre des niveaux inadmissibles et le facteur de puissance se situer le plus souvent en-deçà de sa valeur idéale. Ce constat vaut également quand les valeurs de temps ou de température ne sont pas bien corrélées au réactif qui transite effectivement sur la ligne, à certaines dates ou périodes de l'année. D'où un excès de réactif qui accroît encore les pertes de puissance active.

La commande radio centralisée a une trentaine d'années. Adossée à un système central de surveillance souvent basé sur une approche heuristique, elle se borne à mesurer les flux de puissance réactive dans le disjoncteur de ligne. La communication avec les condensateurs commutés, par exemple, est simplement unidirectionnelle. Souvent, la seule grandeur surveillée est le réactif qui circule dans le disjoncteur. Si l'on reconfigure les lignes de distribution, suite à une manœuvre courante, un équilibrage de la charge ou l'isolement d'un défaut, la logique à base de règles est incapable de détecter automatiquement l'état des batteries de condensateurs sur les lignes raccordées. Ce manque de visibilité, de prédictibilité et d'optimisation du système empêchait la réduction de la tension de

La VVO par modèle multiplie les avantages sur la commande locale et le pilotage radio centralisé.



conservation. D'où l'intérêt des distributeurs pour la VVO par modèle.

De plus en plus de modèles

Les modèles informatiques sont utilisés depuis des décennies pour faciliter la planification et étudier les nombreuses modifications des réseaux de distribution : extensions de ligne, remplacement des conducteurs, ajouts de poste électrique et de ligne, élévations de tension, dispositifs de sectionnement, condensateurs shunt et régulateurs de tension.

Dès le début des années 1990, ces modèles furent de plus en plus utilisés dans l'environnement d'exploitation. Concrètement, des systèmes de gestion d'incidents «OMS» (*Outage Management System*) à base de modèles furent développés pour les centres de distribution. La connectivité du système, l'emplacement des dispositifs de protection et de commutation, et des charges des clients permirent d'accroître la précision des moteurs de prévision des pannes, écourtant d'autant les interruptions de fourniture et améliorant l'efficacité des équipes de terrain.

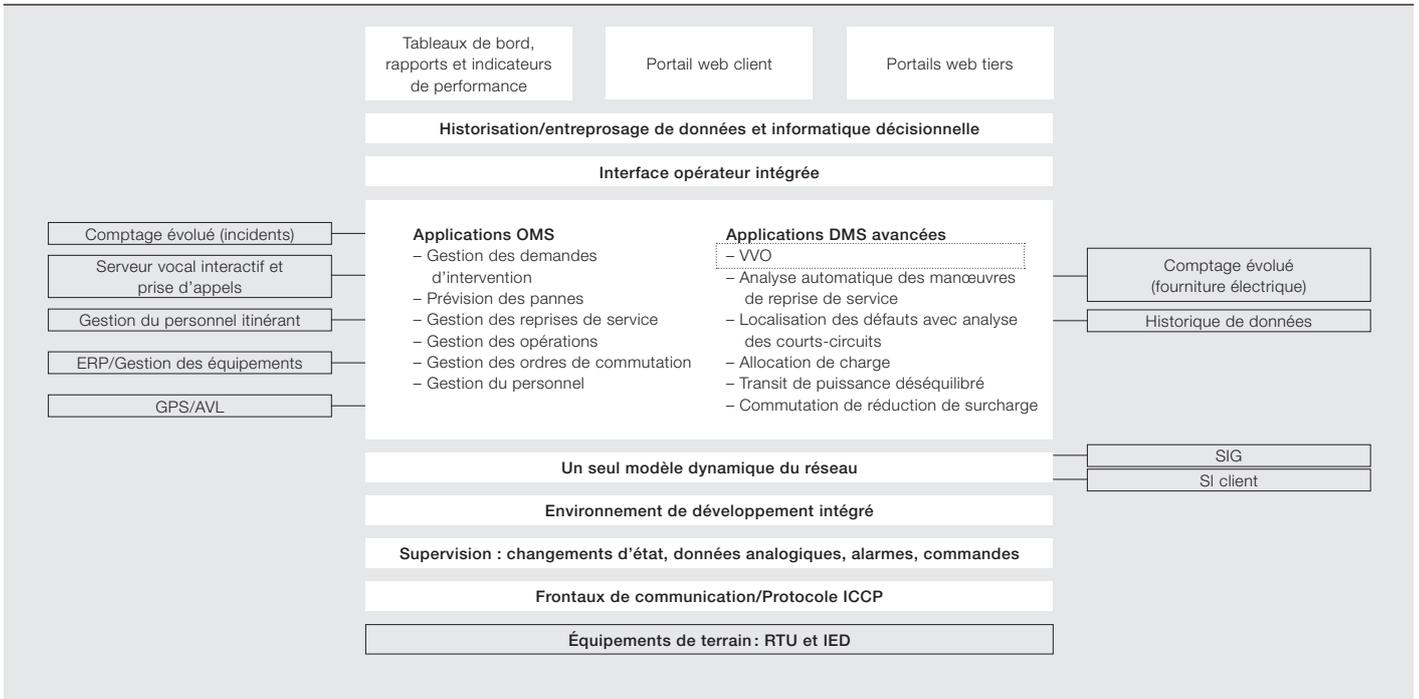
À l'origine, les caractéristiques électriques telles que les impédances d'équipement, les valeurs assignées et les charges, ne figuraient pas dans le modèle, pour plusieurs raisons. *Primo*, l'effort nécessaire au maintien et à l'exploitation de ces données dans un environnement opérationnel était jugé plus important que les bénéfices escomptés. Un modèle de distribution se distingue en effet du modèle de réseau de transport utilisé pour les

systèmes de supervision et de gestion de l'énergie, à la fois par sa taille (10 à 20 fois supérieure) et son régime (non équilibré et par phase) pour calculer avec précision les conditions de distribution. *Secundo*, les applications de réseau de distribution (localisation des défauts, optimisation VVO et auto-cicatrisation) n'ont pas été développées pour tirer parti des modèles de distribution dans l'environnement d'exploitation.

Aujourd'hui, plusieurs facteurs poussent à l'emploi de modèles électriques dans l'environnement opérationnel : économiques tout d'abord, comme le souci de réduire la consommation d'énergie et d'améliorer l'efficacité énergétique, le taux d'utilisation des équipements et la connaissance de l'état du réseau ; techniques ensuite, notamment l'augmentation de la puissance de calcul qui permet de traiter de gros modèles, le nombre croissant d'entreprises disposant d'un SIG complet de leur réseau de distribution, l'ajout d'une instrumentation économique et d'IED, et de communications efficaces et rentables, ainsi que le développement d'applications évoluées comme la VVO.

Top modèle

La VVO par modèle a nombre d'avantages sur la commande locale et le pilotage radio centralisé → 2. Au premier chef, elle utilise l'état opérationnel du système, notamment les rafraîchissements fournis quasiment en temps réel par le superviseur SCADA et le système OMS, ce qui permet aux distributeurs de maintenir un réglage précis de la tension pour mettre



en œuvre la réduction de la tension de conservation sans dépasser les limites du client. Les systèmes à base de modèle sont à même de tenir compte des modifications du réseau au fur et à mesure de leur apparition, comme les transferts de charge et de batteries de condensateurs entre lignes et les variations de charge.

L'approche heuristique traditionnelle, notamment la surveillance du facteur de puissance dans le disjoncteur de ligne, ne donne pas entière satisfaction. En effet, sachant qu'une ligne peut compter des dizaines de kilomètres de conducteurs, ce sont la tension et la puissance réactive transitant dans toute la ligne, et pas seulement dans le disjoncteur ou en d'autres points du réseau, qui influent sur les pertes et la demande électrique. Une stratégie de réglage fondée sur un modèle de flux triphasés non équilibrés est plus précise que la méthode heuristique.

Les technologies qui sous-tendent la méthode VVO (modèle numérique du réseau basé sur le SIG, transmissions bidirectionnelles avec les postes électriques et les équipements de ligne, ressources informatiques et télécoms, etc.) sont aujourd'hui monnaie courante.

La VVO par modèle permettra également aux distributeurs de vaincre de nouvelles complexités : hausse de la production d'énergie renouvelable (EnR) aux niveaux de tension de la distribution, automatisation accrue de la localisation des défauts et des manœuvres de reprise de service, déploiement des processus de surveillance du système et de gestion des équipements, couplage aux infrastructures de recharge des véhicules électriques.

L'intégration des applications DMS à d'autres systèmes de gestion de l'entreprise électrique est source de valeur ajoutée.

Optimisation algorithmique

En termes simples, la VVO par modèle revient à optimiser une fonction objectif soumise à un ensemble de contraintes d'égalité et d'inégalité non linéaires décrit par des milliers d'équations pour le transit de puissance déséquilibré et plusieurs milliers de variables d'état. Les propriétés combinatoires non linéaires non convexes de cette optimisation à très grande

La VVO par modèle contribue à l'insertion croissante de la production d'origine renouvelable.

échelle (caractérisée par la multiplicité des variables d'état) ont de tout temps posé des difficultés au secteur.

Son algorithme vise à minimiser les pertes et/ou la charge de puissance active en appliquant les contraintes suivantes :

- Équations de flux de puissance (système maillé multiphasé, multi-source, déséquilibré) ;
- Tension (phase-neutre ou phase-phase) ;
- Courant (câbles, lignes aériennes, transformateurs, neutre, résistance de mise à la terre) ;
- Réglage de prises (plage de fonctionnement) ;
- Modification de condensateurs *shunt* (fréquence de fonctionnement).

On utilise à cette fin deux variables de régulation :

- La commutation des *shunts* (coordonnée ou non) ;
- La commande des prises de transformateurs régulateurs de tension (coordonnée ou non).

La VVO par modèle met en œuvre des applications de transit de puissance déséquilibré et d'allocation des charges pour obtenir l'état initial du réseau. Elle utilise également le transit de puissance déséquilibré pour fournir des facteurs de sensibilité (gradients), obtenir des solutions intermédiaires dans les itérations de réglage de tension et vérifier la faisabilité des solutions en lice. Contrairement au régime équilibré, l'application de transit déséquilibré se justifie par les nombreuses charges monophasées que compte habituellement un réseau de distribution, de même que les embranchements monophasés qui peuvent comporter des régulateurs et des condensateurs pilotables.

Le modèle courant de distribution triphasée déséquilibrée de la VVO s'accommode de toutes les configurations habituelles de raccordement des transformateurs, des réseaux isolés de la terre ou faiblement mis à la terre, et de n'importe quel degré de maillage.

Par souci de précision, on utilise un modèle détaillé du réseau. Des modèles basés sur les phases en représentent chaque élément. Les charges ou les batteries de condensateurs peuvent être

couplées en triangle ou en étoile. Les transformateurs offrent de nombreuses possibilités de configuration : triangle ou étoile, secondaire en avance ou en retard avec ou sans résistance de terre, réglage primaire ou secondaire → 3.

Les réglages de tension et de puissance réactive peuvent être coordonnés ou non, la méthode convenant aussi bien aux réseaux radiaux que maillés, mono ou multisources. Les réglages de tension s'appliquent à chaque phase, à l'aide d'une tension phase-terre ou phase-phase, selon le type de raccordement de la charge. N'importe quel dispositif de réglage ou batterie de condensateurs temporairement déconnecté, pour cause de maintenance ou de dysfonctionnement, peut être ponctuellement exclu de l'analyse.

La VVO par modèle prend en compte la caractéristique dépendante de la tension de la charge pour modéliser la réduction de la demande par rapport à la diminution de la tension des charges. Les paramètres optimaux de chaque régulateur ou changeur de prises dépendent de la mixité des charges (puissance constante et impédance constante), sur le circuit de distribution.

Intégration aux fonctions avancées de pilotage

Une fois en place, l'infrastructure et les moyens nécessaires à la VVO par modèle (modèle de réseau, superviseur, infrastructures de communication, serveurs) peuvent être mis à profit pour assurer des fonctions DMS supplémentaires telles que l'auto-cicatrisation (analyse automatique des manœuvres de reprise de service), le transit de puissance déséquilibré, la localisation des défauts et la commutation de réduction de surcharge. Qui plus est, le couplage de ces applications à d'autres systèmes de gestion de l'entreprise électrique (réponse à la demande, informatique décisionnelle et pilotage des incidents) est source de valeur ajoutée → 4.

Ces systèmes peuvent aussi tirer parti d'une meilleure « observabilité » de l'état électrique et fonctionnel du réseau. La représentation, sous forme de cartes graphiques ou de tableaux dans le système DMS, de l'état des outils de réglage de tension et de puissance réactive le long d'une ligne d'alimentation en

fonctionnement améliore la perception et la connaissance du réseau par les opérateurs. La VVO par modèle bénéficie également des alarmes SCADA et DMS pour signaler les défaillances des automatismes de poste/ligne, la rupture des fusibles de condensateurs ou le dysfonctionnement des régleurs ou batteries de condensateurs. Ces informations, entre autres, alimentent à leur tour des logiciels de gestion des éléments du réseau et des équipes d'intervention. Les données de réduction de la demande et des pertes peuvent être transférées à des systèmes qui évaluent les économies tirées de la diminution du coût du combustible pour le producteur d'électricité et du prix d'achat de l'énergie pour le fournisseur.

Avantages

La VVO par modèle a bien des atouts sur les précédentes méthodes.

Optimum mathématique calculé et non plus déduit d'une méthode heuristique à base de règles :

- La réduction maximale des pertes et de la demande électrique, ainsi que la libération de capacités sont déterminées à l'aide d'une méthode de programmation mixte entière non linéaire ;
- Les objectifs d'exploitation peuvent être modifiés en fonction de contraintes économiques ;
- L'optimisation est paramétrable pour s'exécuter suivant un calendrier donné ou sur modification importante du système ;
- Des simulations hors ligne permettent d'étudier les différentes configurations et contingences du système.

Optimisation fondée sur l'état fonctionnel du réseau :

- En cas de panne et de reconfiguration du système, le réseau préserve la connectivité des charges, batteries de condensateurs, régleurs et autres équipements de ligne ;
- Le modèle de réseau est régulièrement actualisé, dans le cadre du processus de mise à jour des incidents et de la distribution ;
- L'emploi d'un modèle unique de réseau fonctionnel, commun à toutes les applications des réseaux électriques du futur, garantit la cohérence de l'ensemble.

Réduction des coûts d'infrastructure et de maintenance pour mettre en œuvre de multiples applications DMS :

- La VVO par modèle utilise les mêmes ressources que la supervision, l'OMS et d'autres applications DMS ;
- La gestion de la distribution intégrée évite de dupliquer les infrastructures de calcul et l'environnement de communication pour mettre en œuvre d'autres applications des réseaux électriques du futur ;
- Un seul modèle de réseau de distribution élimine les problèmes de synchronisation entre les différents modèles de diverses applications.

Utilisation d'un modèle détaillé de réseau triphasé déséquilibré :

- Le réglage gagne en précision ;
- De nombreux paliers de tensions (notamment aux niveaux de la répartition et du secondaire) peuvent être modélisés ;
- Les topologies maillées et bouclées, et pas seulement radiales, sont prises en compte ;
- L'impact sur tout le modèle de réseau est calculé ;
- Le déséquilibre de tension est inclus, de même que les réglages coordonnés et classiques.

Modélisation explicite des charges des clients :

- La représentation des charges est fonction de la tension puisqu'elles diffèrent selon la tension et les exigences de puissance réactive ;
- L'emplacement, la taille et le type de charges sur le réseau déterminent le paramétrage optimal des changeurs de prises et autres actionneurs pour la réduction de la tension de conservation ;
- La tension aux points de charge est calculée et comparée aux limites de fonctionnement ;
- Les charges des clients peuvent être représentées en fonction du temps.

Le meilleur reste à venir

La VVO par modèle s'accorde parfaitement aux autres avancées des réseaux de distribution, comme l'usage accru de fonctions automatiques et explicites de localisation et correction des défauts, qui reconfigurent le réseau en modifiant l'emplacement des charges, des régleurs de tension et des batteries de condensateurs. La VVO par modèle s'en acquitte

fort bien, contrairement aux anciennes méthodes à base de règles.

Autre atout : sa contribution à l'insertion massive des EnR. Les distributeurs connaissent bien les fluctuations de tension causées par le couplage de cette production décentralisée et intermittente aux réseaux de distribution, en particulier les systèmes photovoltaïques résidentiels monophasés. La solution VVO d'ABB y remédie puisqu'elle sait déjà modéliser plusieurs sources et gérer la puissance réactive des EnR.

Grâce au déploiement des compteurs électriques de nouvelle génération et des dispositifs économiques de détection à distance de la tension, aux points de consommation, les programmes d'optimisation pourront bénéficier de relevés supplémentaires en bout de chaîne, qui amélioreront encore les performances du modèle.

Tim Taylor

Ventyx (société du Groupe ABB)

Raleigh-Durham, Caroline du Nord (États-Unis)

tim.taylor@us.abb.com