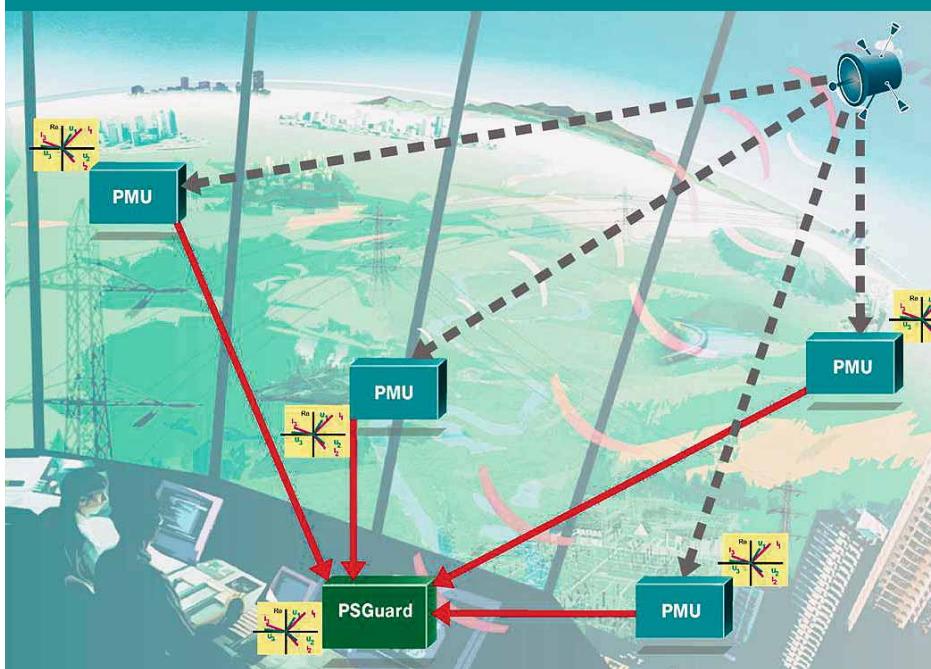


# L'autocicatrisation dans la ligne de mire

Khosrow Moslehi, Ranjit Kumar



Les pannes spectaculaires qui ont récemment frappé certaines régions du monde ont jeté le discrédit sur fiabilité des réseaux électriques. La facture économique et sociale de ces grands incidents se chiffre chaque année en milliards de dollars. A l'ère du tout-numérique, les procédés de fabrication dopés par l'informatique et l'électronique de puissance colonisent l'industrie: la part croissante du poste électricité dans le budget énergétique total accentue l'enjeu de la fiabilité. Cet article envisage les solutions d'avant-garde qui permettront d'améliorer cette caractéristique par une surveillance synchronisée et une conduite coordonnée de tout le système électrique.

L'augmentation des risques de coupure généralisée a plusieurs causes technico-économiques: l'accroissement des transits de puissance sur de longues distances; la pénurie d'investissements dans les réseaux de transport qui évoluent nettement moins vite que la demande; les énormes variations journalières des schémas de consommation, qui érodent l'efficacité des planifications hors ligne classiques; le regroupement des opérateurs. L'ensemble se traduit par l'élargissement des zones d'action et le durcissement des contraintes dues à la croissance de la demande (faible marge d'erreur, grande réactivité). Cette évolution du paysage électrique en fragilise l'exploitation, obligeant les systèmes à fonctionner aux limites.

D'où l'enjeu d'intensifier les analyses en ligne et de mieux coordonner les commandes sur le réseau global. La surveillance de réseaux à grande échelle et des outils de conduite comme les unités de mesure de phaseurs (PMU) et les dispositifs FACTS [1], de même que la production décentralisée et les équipements de stockage sont aux avant-postes des techniques de résolution des incidents.

ABB est un grand fournisseur de produits et services innovants et éprouvés pour la filière électrique. Cet article présente les conclusions d'un travail de recherche visant, sous l'égide du consortium américain IntelliGrid de l'EPRI (*Electric Power Research Institute*), à définir les exigences de la

prochaine génération de techniques de conduite et de surveillance des systèmes électriques. La tendance dans ce domaine est aux réseaux prévisibles «autocicatrisants», censés anticiper les menaces de panne, avaries de matériels et autres phénomènes de déstabilisation en évitant et en endiguant l'extension de ces incidents [2]. Cinq grandes missions leur sont confiées:

- Détection opportune des problèmes imminents;
- Redéploiement des ressources pour en limiter l'impact;
- Réaction rapide et coordonnée aux perturbations en cours;
- Minimisation de la perte de service en toutes circonstances;
- Limitation du temps de reconfiguration et de reprise de service.

## Energie

La réalisation d'un réseau autocatérisant impose une infrastructure informatique et télécoms (IT) à la fois performante et capable de combler les lacunes de la coordination géographique et temporelle des outils de conduite et de surveillance du système électrique. Les méthodes actuelles doivent être considérablement améliorées aux divers échelons de la hiérarchie (postes, zones de réglage, régions et réseau). La coordination temporelle, notamment, doit parfaire l'adaptation des actions «réflexes», souvent locales, aux commandes globales, plus lentes.

ABB est à l'origine des spécifications architecturales et fonctionnelles de cette infrastructure IT nécessaire à la construction d'un réseau autocatérisant; le Groupe en a d'ailleurs étudié la faisabilité technique et économique [3, 4], ce dont cet article rend brièvement compte.

### Infrastructure d'un réseau autocatérisant

Bâtir un tel réseau oblige à répondre à une longue litanie de questions opérationnelles (en régime normal ou perturbé) relatives à la quête de performances, à l'adéquation des ressources au marché (approvisionne-

ment électrique...) et aux limites de fonctionnement des équipements et installations (stabilité, fortes oscillations de puissance...), sans oublier la protection en normal/secours des composants et systèmes.

**ABB est à l'origine des spécifications architecturales et fonctionnelles de cette infrastructure IT nécessaire à la construction d'un réseau autocatérisant.**

Les capacités d'analyse en ligne dont nous disposons aujourd'hui sont appelées à renforcer leur rôle dans l'infrastructure envisagée pour résoudre ces problèmes d'exploitation. De plus, les fonctions actuellement hors ligne (prévision, analyse dynamique, étude des capacités de transport...) migreront vers le temps réel (en ligne). Les détails de leur mise en œuvre sont variables de même que leurs interdépendances dans les domaines fonctionnels de l'acquisition des données, de la maintenance, de la surveillance, de l'amélioration des performances et de la commande. Ces

disciplines doivent fournir des services «non stop» en termes de :

- Prise en compte de la situation du réseau dans son entier;
- Prévision, prévention et maîtrise des régimes incidentels;
- Application des programmes d'exploitation et des marges requises;
- Aide à la reconstitution du système.

Ces fonctionnalités doivent faire intervenir des outils d'aide à la décision en ligne, à grande capacité de traitement et de communication. Notre infrastructure s'appuie sur un système distribué dans lequel l'emplacement du matériel, du logiciel et de l'information est transparent à l'utilisateur; elle permet à des agents logiciels «intelligents» et répartis d'accomplir les tâches pour lesquelles ils sont conçus et de prendre en charge des traitements à visée locale, globale et/ou collaborative, grâce à un accès efficace, en temps utile, à l'information.

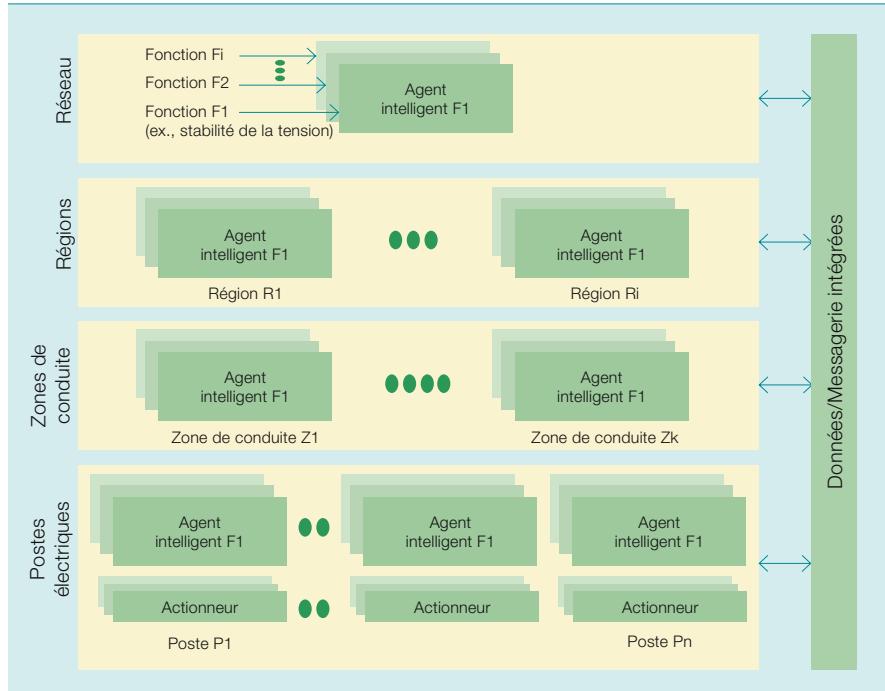
### Architecture

L'infrastructure IT recherchée 1 doit être modulaire, souple et évolutive pour satisfaire les besoins d'exploitation globaux et permettre son déploiement à l'échelle d'un continent.

Son arsenal informatique et télécoms est constitué d'une foule d'ordinateurs et de processeurs embarqués, disséminés dans tout le système. Ceux-ci doivent communiquer sur des réseaux dotés d'interfaces normalisées utilisant des logiciels intermédiaires orientés messages et des services web. Ce réseau se charge des échanges de données à l'échelle tant locale que globale et des traitements décisionnels, moyennant des bases de données distribuées, intégrées par le biais d'interfaces ouvertes. Le tout est bâti sur un matériel et un logiciel autoconfigurable.

Cette infrastructure étaye un ensemble d'applications logicielles, dont des agents intelligents, autonomes et éparsillés dans le système suivant une hiérarchie virtuelle; ils s'adaptent aux environnements et aux événements tout en se concertant ou en s'opposant, pour le bien de la collectivité. Ils peuvent améliorer les perfor-

1 Organisation des agents intelligents répartis dans le système électrique



mances du contrôle-commande en réagissant plus vite que l'opérateur de conduite [5]. Le système intègre ainsi davantage d'*«intelligence»* à tous les niveaux, plus particulièrement au bas de cette hiérarchie (postes électriques) pour garantir des réponses précises et opportunes.

Ces agents se répartissent dans une architecture à trois dimensions tenant compte de la topologie, de la hiérarchie de conduite et de la diversité des zones fonctionnelles du système électrique. Plusieurs utilisateurs et composants logiciels peuvent, en divers endroits, consulter et maintenir

les données statiques et dynamiques éparses, dans des bases de données relationnelles virtuelles.

**Chaque cycle peut s'adapter à la réactivité voulue de la conduite, à la charge de traitement et aux règles de l'art.**

Définir l'autonomie de ces «acteurs», à chaque niveau d'intervention, et les protocoles de résolution des conflits

entre niveaux peut s'avérer problématique. En règle générale, les logiciels de la couche supérieure doivent traiter les données d'une plus grande partie du système; de leur côté, les logiciels inférieurs peuvent apporter une réponse rapide et ponctuelle aux informations locales, en fonction des toutes dernières consignes de la hiérarchie supérieure.

Certains plans de protection et d'actions correctives préfigurent ces agents intelligents ; ils devraient gagner en efficacité grâce à un réglage fréquent effectué en amont et à l'amélioration des fonctions d'analyse locale.

#### Des cycles d'exécution pour coordonner les tâches

A cela se greffe une dimension temporelle dans laquelle peuvent se ré-

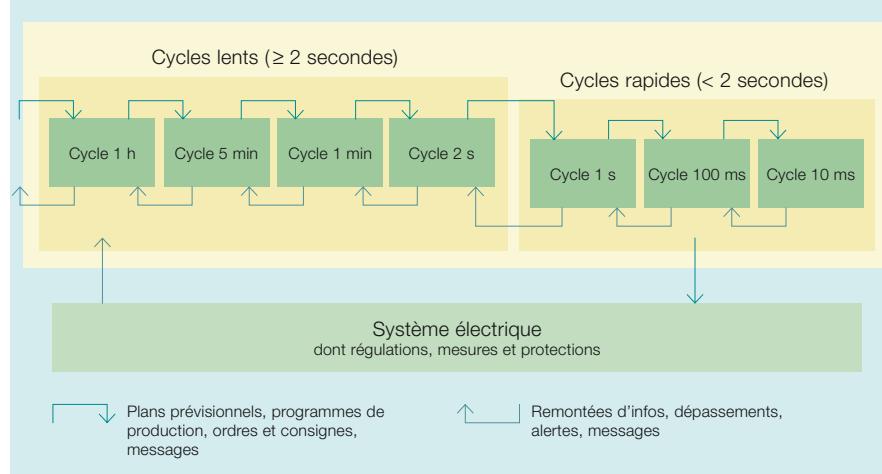
#### Des agents autonomes et intelligents

En informatique, un agent logiciel agit «au nom» d'un utilisateur ou d'un programme, sous la houlette d'une autorité décidant du moment et de la pertinence de l'action. L'idée est que ces agents ne reçoivent pas l'ordre d'accomplir une tâche, mais s'emploient à l'activer eux-mêmes en s'adaptant dynamiquement à leur environnement.

Ces agents tirent leur «intelligence» de leurs facultés d'apprentissage et de raisonnement, et leur «autonomie» de la possibilité d'adapter leur mode opératoire au contexte, sans intervention humaine. Ils peuvent au besoin être éparpillés sur différentes machines ou être mobiles pour transférer leur exécution à divers processeurs. Les systèmes multi-agents mutualisent des agents distribués agissant de concert pour accomplir leur mission, de manière synchrone ou asynchrone, et accéder à des bases de données décentralisées.

Cette coordination multi-agent se doit de a) hiérarchiser, ordonner et/ou synchroniser les tâches; b) faciliter la communication et la collaboration par une ontologie apte à représenter les connaissances et métadonnées selon une organisation hiérarchique; c) détecter toutes les éventuelles modifications de l'environnement et y remédier.

#### 2 Enchaînement et interaction des cycles d'exécution



#### Encadré Les cycles d'exécution de la coordination temporelle

Période	Missions
1 h	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Garantir l'adéquation des ressources.</li> <li>■ Identifier les goulets d'étranglement.</li> </ul>
5 min	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Fiabiliser et optimiser l'exploitation.</li> <li>■ Mettre à jour les paramètres et seuils de conduite.</li> <li>■ Anticiper (horizon de 10 à 20 minutes).</li> <li>■ Alerter l'exploitant et/ou le cycle d'une heure.</li> </ul>
1 min	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Fiabiliser et optimiser l'exploitation (idem cycle de 5 min).</li> <li>■ Adapter les modèles les plus récents.</li> </ul>
2 s	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Collecter/valider les données destinées à la zone de réglage ou à l'interconnexion, y compris les mesures des PMU (cycle de 10 ms).</li> <li>■ Exécuter des régulations en boucle fermée (contrôle-commande de production de zone...).</li> <li>■ Adapter les paramètres et seuils de conduite aux cycles plus rapides.</li> </ul>
1 s	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Réguler les grands transitoires (réglage de la tension secondaire...).</li> <li>■ Adapter les paramètres et seuils de conduite aux cycles plus rapides.</li> </ul>
100 ms	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Contrôler les instabilités imminentes du système par l'exécution, notamment, de plans de protection spéciaux (ISPS) basés sur des modèles adaptatifs ou des critères identifiés par les cycles plus lents.</li> </ul>
10 ms	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Lancer des protections intelligentes rapides : délestage, déclenchement de groupe de production, séparation du réseau (ilotage).</li> </ul>

## Energie

partir les diverses tâches des agents, en fonction des échelles de temps des phénomènes physiques du système électrique. Cette coordination temporelle se concrétise par des «cycles d'exécution» (ensemble de tâches connexes exécutées dans un espace-temps coordonné) 2 dont on définit la périodicité selon les besoins de l'exploitation et du développement. Chaque cycle peut s'adapter à la réactivité voulue de la conduite, à la charge de traitement et aux règles de l'art ; sa durée et ses missions sont configurables en fonction des problèmes d'exploitation, sa période exacte (échelonnée de 10 millisecondes à 1 heure) dépendant de l'application ( **Encadré** p. 23).

### Chaque agent fonctionnel est constitué de briques élémentaires autoconfigurables.

C'est le délai d'acquisition des données en temps réel qui permet de qualifier ces cycles de «rapides» ou «lents». Dans un futur proche, les techniques de communication placeront aux alentours de 2 secondes la démarcation entre ces deux catégories 2.

Les cycles lents se chargent du calcul intensif nécessaire au contrôle-commande coordonné, à l'optimisation des performances et aux stratégies de conduite, à l'échelle du système ; les cycles rapides répondent aux besoins analytiques locaux (poste électrique et périphérie) pour réagir aux événements rapides en appliquant les stratégies élaborées par les cycles lents. Ces derniers bénéficient d'un haut degré d'intelligence tandis que les cycles rapides se contentent de plus faibles doses. Les cycles d'exécution interagissent par l'échange de déclencheurs d'événement, de paramètres de conduite, d'indicateurs de problème, d'alertes...

Tout cycle comporte un certain nombre d'agents fonctionnels constitués chacun de briques élémentaires autoconfigurables ou «composants», réutilisables dans d'autres contextes.

### Sans estimation d'état, pas d'autocatérisation !

Aujourd'hui, dans les centres de conduite, les fonctions analytiques sont pour l'essentiel limitées aux cycles lents. L'estimation d'état, par exemple, joue un rôle primordial en fournissant un instantané précis de l'exploitation en régime établi tout en minimisant les conséquences des erreurs sur les données disponibles. Les résultats de l'estimateur d'état sont utiles non seulement à l'opérateur mais aussi aux diverses tâches analytiques des cycles lents. Celles-ci ont besoin de solutions adaptées à des réseaux toujours plus vastes, à faible dérive temporelle, pour répondre aux nouvelles données du marché électrique et à l'éternel souci de fiabilité. Or les cycles rapides doivent aussi satisfaire à ces impératifs pour prétendre à l'autocatérisation.

Pour relever ces défis, l'estimation d'état doit développer la coopération entre agents répartis, chacun renseignant les autres sur l'état de sa partie du réseau, à un instant donné, avec une précision de quelques millisecondes.

Dans ce contexte, l'agent estimateur d'état d'un poste électrique récupère les données d'un poste et de son voisinage électrique défini en temps réel par un agent de niveau supérieur.

De son côté, l'agent estimateur d'état d'une zone de réglage reçoit les données, dans une tranche horaire précise, de tous les agents de poste implantés dans la zone et élabore une solution pour la zone en question. Cette organisation impose de traiter les problèmes de coordination géographique et temporelle, aux frontières des différentes zones. De même, les agents estimateurs d'état des niveaux régionaux et supérieurs doivent coordonner les solutions émanant des différentes zones de réglage.

### Les graphiques évolués doivent se fondre en toute transparence dans la navigation et l'affichage moyennant des animations et représentations 3D.

Cette mise en œuvre de l'estimation d'état sous forme de solution collaborative limite les dérives temporelles à quelques millisecondes, quelle que soit l'étendue du système (sous réserve d'utiliser des PMU pour toutes les mesures). Une estimation d'état de durée inférieure à la seconde est capitale pour accélérer la conduite locale rapide (au niveau poste, par ex.). La validation de cette estimation d'état à

#### Prévention des pannes générales : la règle de trois

Un réseau autocatérisant est par définition capable d'empêcher ou de limiter les dégradations de la fourniture électrique, et de reconstituer le réseau dans les meilleurs délais. Trois grandes philosophies font autorité [6].

##### Probabilité de la panne totale

**Le :** le système électrique est par nature soumis à des aléas incontrôlables par l'homme, induisant des perturbations notables.

##### Renforcement des maillons faibles du système électrique

**Le :** chaque perturbation a pour effet de mettre en évidence une lacune du système. Les renforts successifs font que la perturbation suivante



doit toujours être de plus grande ampleur pour identifier la lacune suivante, et ainsi de suite.

**Maîtrise des problèmes par une meilleure ingénierie :** les promoteurs de ce concept entendent pallier la complexité du système électrique en prévoyant et en empêchant (ou limitant) les incidents afin d'enrayer toute dégradation.

l'échelon local améliore la qualité des solutions d'estimation d'état des niveaux supérieurs.

Un affichage efficace de l'information doit permettre à l'opérateur d'appréhender instantanément l'état du système et d'agir sans délai. Cette observabilité du réseau fait partie intégrante de l'analyse et de la conduite. Outre cet instantané opérationnel, il faut pouvoir visualiser des tendances, des

#### La gestion de réseaux ABB

ABB est un grand fournisseur d'équipements, de solutions et de services innovants permettant de fiabiliser un système électrique et d'en améliorer la performance économique. Les techniques avancées de conduite et de surveillance sont les deux composantes majeures de son offre.

**Les activités Gestion de réseaux et Automatisation de postes électriques** d'ABB fournissent pour cela des équipements et des systèmes clés en main; elles sont à l'avant-garde du développement de systèmes informatiques et télécoms facilitant l'intégration transparente du transport et de la distribution (T&D). Leur plate-forme conjugue la gestion de la distribution (DMS) et de l'information sur les composants hors service (OMS), la téléconduite et la gestion de l'énergie (SCADA/EMS), ainsi que le négocie d'énergie et la surveillance à grande échelle (WAMS). Rappelons que cette dernière utilise des mesures de phaseurs pour connaître l'état du réseau, en des points stratégiques dispersés sur de très vastes étendues. Ces relevés et leur horodatage précis, à la source, peuvent fournir une image fidèle du réseau, dépassant largement le cadre d'une seule zone de réglage, et accélérer la coordination des régulations.

données prévisionnelles et des scénarios d'anticipation. Plusieurs vues d'un même objet sont également utiles pour présenter différents aspects du système à quantités d'utilisateurs ayant des besoins distincts.

Ces graphiques évolués doivent se fondre en toute transparence dans la navigation et l'affichage moyennant des animations et représentations 3D, le but à terme étant de créer un environnement de «réalité virtuelle».

#### Conclusions

Conforme à la démarche de maîtrise des problèmes par une meilleure ingénierie, notre solution nécessite le déploiement d'agents fonctionnels intelligents et autonomes, au sein d'un système à l'échelle de l'interconnexion, pour construire un réseau autocicatrisant. Le système doit s'adapter aux variables d'exploitation pour analyser et préserver sa fiabilité en temps réel comme à très court terme. Les interactions des composants intelligents de cette infrastructure seraient orchestrées par des cycles d'exécution correspondant aux phénomènes physiques et problèmes d'exploitation du système électrique.

Le renforcement des capacités de surveillance et de régulation, par la coordination des actions locales et globales, garantit la résilience nécessaire à la continuité de service et à l'automatisation accrue du réseau. Les décisions de conduite locale, prises dans l'extrême urgence (moins d'une seconde), seraient plus rapides et plus robustes que celles ne faisant intervenir que des opérateurs ou des régulations de niveau supérieur.

Cette nouvelle infrastructure peut s'appuyer sur des technologies existantes, opérationnelles et éprouvées. Si les indispensables techniques d'analyse sont pour la plupart déjà

utilisées dans plusieurs processus en ligne et hors ligne (protections, régulations de génératrices, fonctionnement aux limites, par ex.), certaines améliorations en termes de vitesse, d'automatisation, de distribution et de coordination s'imposent.

Notre système pourrait s'implanter progressivement, en commençant par l'autocicatrisation de l'artère du réseau, pour gagner ensuite d'autres maillons de la chaîne de transport au gré des besoins et des contraintes budgétaires. Le déploiement de l'estimation d'état, mentionnée plus haut, servirait de fondation à la construction de l'infrastructure requise.

En l'occurrence, nous avons étudié la faisabilité fonctionnelle, architecturale et financière de cette infrastructure. En atteste une méthodologie d'évaluation de sa rentabilité, au regard des coûts matériels et logiciels. Il en est immédiatement ressorti des bénéfices économiques avec la décongestion du réseau et un gaspillage minimal d'énergie résultant du déblocage des seuils d'exploitation et de la réduction des coupures. ABB ne ménagera pas ses efforts pour améliorer les produits et technologies visant à fiabiliser les systèmes électriques et promouvoir l'autocicatrisation du réseau.

#### Khosrow Moslehi

Gestion de réseaux ABB  
Santa Clara (Californie)  
khosrow.moslehi@us.abb.com

#### Ranjit Kumar

Consultant du projet  
Gestion de réseaux ABB  
Santa Clara (Californie)

#### Bibliographie

- [1] Pourbeik, P., Bahrman, M., John, E., and Wong, W. (2006) Modern Countermeasures to Blackouts, IEEE Power & Energy Magazine, 4 (5), p. 36–45.
- [2] Amin, M., S. and Wollenberg, B. (2005) Toward a Smart Grid, IEEE Power & Energy Magazine, 3 (5), p. 34-41.
- [3] Moslehi K., Kumar, R., Chiang, H-D., Laufenberg, M., Bose, A., Hirsch, P., and Beard, L. (2004) Control Approach for Self-Healing Power Systems: A Conceptual Overview, Presented at the Electricity Transmission in Deregulated Markets: Challenges, Opportunities, and Necessary R&D, Carnegie Mellon University, Dec. 15–16, 2004
- [4] Moslehi K., Kumar, R., Hirsch, P. (2006) Feasibility of a Self-Healing Grid – Part I Methodology and Cost Models, Part II Benefit Models and Analysis, Presented at IEEE PES General Meeting – Montreal, June 2006.
- [5] Rehtanz, C. (2003) Autonomous Systems and Intelligent Agents in Power System Control and Operation. Springer-Verlag, New York.
- [6] Fairley, P. (2004) The Unruly Power Grid, IEEE Spectrum, Aug 2004, p. 22–27.