

Réseaux électriques équipés de mesureurs de phase

L'utilisation de mesureurs de phase offre de nombreux avantages tels que le contrôle des risques de congestion. Elle est également un support appréciable pour le rétablissement des réseaux en état critique.

L'enseignement de la théorie des réseaux électriques dans les Hautes Ecoles Spécialisées (HES) suscite un nouvel intérêt chez les étudiants grâce notamment à l'utilisation des nouvelles technologies telles que par exemple les communications par satellite ou le recours à des contrôleurs électroniques de flux d'énergie dans les lignes à haute tension. Les concepts de base qui utilisent tout simplement les nombres complexes dans le cas d'un calcul de flux de charges ou d'un court-circuit sont mieux compris par les étudiants si ces derniers peuvent réaliser des exercices très concrets en laboratoire. La matière est ainsi mieux assimilée et le candidat ingénieur peut ensuite atteindre un objectif plus élevé. Le mélange d'un projet de recherche appliquée et de l'enseignement est un cas idéal d'osmose théorie-pratique pour les étudiants, pour les écoles et pour l'industrie qui peut découvrir le futur ingénieur qu'elle désire et peut-être l'engager par la suite¹⁾.

La gestion technique des répartitions de puissances (allemand: Lastfluss, anglais: Load Flow) dans les réseaux électriques repose essentiellement sur les tensions et les courants. Mais ces grandeurs

Hubert Sauvain, Jean-François Affolter, Joachim Bertsch

ne sont connues généralement que sous la forme de leurs modules. En effet, il est relativement facile de transmettre une information sur un module de tension ou de courant depuis un nœud vers le centre de contrôle-commande. Cette méthode s'est donc naturellement imposée depuis longtemps. Elle ne nécessite pas la présence d'un signal horaire de référence pour comparer des phases.

Les satellites (et autres moyens de communications d'aujourd'hui, figure 1) offrent la possibilité d'extraire le paramètre phase. Ces satellites fournissent en effet une référence horaire avec une précision dans le domaine des microsecondes, ce qui correspond à une fraction d'un degré électrique. On peut donc obtenir aujourd'hui l'information totale du phaseur à savoir son module et sa phase, par exemple la tension (formule 1):

$$\underline{U} = U \cdot e^{j\varphi} \quad (1)$$

Cette information «nouvelle» offre toute une série d'avantages dont le premier est de pouvoir appliquer sur le terrain tout ce qui a été appris par les ingénieurs lors de leurs études, notamment l'application des incontournables nombres complexes.

Avantages des phaseurs

Les avantages des phaseurs apparaissent immédiatement au niveau de l'électrotechnique, mais aussi au niveau des risques de congestion, d'instabilité ou de coupure généralisée et de reconstruction du réseau. On peut également en déduire des effets sur l'approche économique.



Figure 1 Signal horaire transmis d'un satellite à tout endroit du réseau électrique

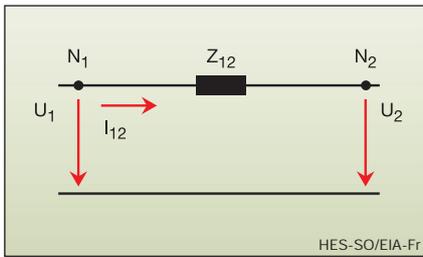


Figure 2 Réseau équipé de mesureurs de phaseurs

Exemple

Un des cas les plus simples comprend une ligne entre 2 nœuds N1 et N2 (figure 2). On mesure les 2 phaseurs de tension U1 et U2 aux nœuds. En connaissant par exemple l'impédance longitudinale de la ligne Z12 on en déduit le courant dans la ligne, les courants chez le consommateur au nœud N2. Par conséquent on peut extraire les puissances apparente, active et réactive selon formule 2. Le fournisseur d'énergie au nœud N1 peut connaître l'état de la clientèle de l'autre propriétaire au nœud N2.

$$\underline{S}_1 = \underline{P}_1 + j\underline{Q}_1 = 3 \cdot \underline{U}_1 \cdot \underline{I}_{12}^*$$

$$\underline{Z}_{12} = \frac{\underline{U}_1 - \underline{U}_2}{\underline{I}_{12}} \quad (2)$$

Cette approche purement technique montre que l'application «scolaire» des nombres complexes peut devenir sous une certaine forme un outil d'analyse économique. Mais cette conclusion n'est pas le premier but recherché. De plus l'application de logiciel pour le calcul des répartitions de puissances repose déjà sur la connaissance des puissances consommées ou générées en chaque nœud.

Détermination des paramètres des lignes

Régimes symétriques

Les paramètres électriques des lignes ou des câbles reliant 2 nœuds sont soit calculés soit mesurés à l'aide d'un essai à vide et en court-circuit, cet essai demandant cependant un arrêt local d'exploitation et générant des coûts d'ingénierie et de manutention. La mesure permanente

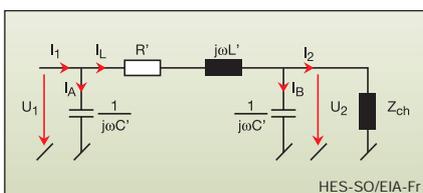


Figure 3 Extraction des paramètres électriques d'une ligne, respectivement d'un câble

des phaseurs de tension et de courant en chaque nœud permet de déterminer sans autre intervention les impédances longitudinales et les admittances transversales sur la base du schéma en π comme le montre la figure 3.

Régimes non symétriques

Cette méthode est évidente pour l'obtention de la composante directe (inverse, respectivement) selon Fortescue pour des lignes courtes. Toutefois, en cas de courts-circuits non symétriques tels qu'un court-circuit monophasé ou biphasé à la terre, la connaissance du schéma en π homopolaire est également exigée.

Pour la mesure de la composante homopolaire, il faut naturellement avoir une charge non symétrique de la ligne avec courant dans le neutre (respectivement la terre), ce qui souvent n'est pas le cas.

Un exemple avec composante homopolaire a été calculé avec le logiciel Matlab et confirmé sur un simulateur analogique situé à l'Ecole d'ingénieurs de Fribourg/HES-SO.

Simulateur analogique

Le simulateur triphasé 3x400 V (figure 4) représente un réseau à 5 nœuds pour les niveaux 440/220/65 kV avec 5 machines synchrones et une ligne longue à demi-longueur d'onde $\lambda/2$. Des courts-circuits symétriques ou non symétriques peuvent être réalisés dans les nœuds et les lignes. Des relais de protection peuvent être introduits. Le simulateur contient également un régulateur de flux appelé FACTS²⁾ ou plus précisément UPFC³⁾.

Eléments	Valeurs de référence	Valeurs moyennes mesurées
R [Ω]	3,4	3,4
X [Ω]	34,5	31,7
B [μS]	376,6	354,5
G [μS]	-	1,9

Tableau I Paramètres de ligne de référence et mesurés

Lignes	3 lignes sans UPFC		2 lignes* sans UPFC		avec UPFC	
	P [%]	P [%]	P [%]	P [%]	P [%]	P [%]
L241 (UPFC)	40,8	70,7	47,7			
L242	41,4	En panne	En panne			
L251	17,8	29,3	52,3			
Charge totale	100	100	100			

* Ligne 242 déconnectée (figure 7)

Tableau II Répartition des puissances actives dans un corridor

Une centrale photovoltaïque 2 kW y est reliée.

Application à une ligne 400 kV

Des essais qui ont eu lieu sur une ligne en Suisse vers l'Italie ont permis d'extraire les paramètres d'une ligne 400 kV [1]. Le tableau I et la figure 5 ci-après résument ces essais.



Figure 4 Simulateur analogique de l'Ecole d'ingénieurs de Fribourg/HES-SO

Les caractéristiques principales du simulateur sont: 3x400 V, 5 A. Les facteurs d'échelle retenus sont: 5 kVA pour 500 MVA; 400 V pour 65 kV. Les impédances sont transformées selon: $Z = U^2 \cdot S^{-1}$

Lignes	PST	PST et UPFC	
	seul P [%]	min. P [%]	max. P [%]
L241 (UPFC)	34,3	10,3	47,5
L242	30,4	33,9	27,2
L251	35,3	55,8	25,3
Charge totale	100	100	100

Tableau III Répartition des puissances actives dans un corridor avec 2 FACTS

	Moment	Charge Lukmanier (limite de transit 2400 A) P [%]	Différence d'angle de phase Lukmanier	
			avant la panne Angle [°]	après la panne du Lukmanier Angle [°]
Flux de charge de référence	Hiver 2003	47	10	20
Juste avant la panne	28.09.2003 03h00	86	18	42

Tableau IV Evolution des angles aux extrémités d'une ligne [7]

La différence entre la valeur de référence et la valeur moyenne mesurée par la présente méthode des phaseurs atteint jusqu'à 9% lors de ces premiers essais. Entre calcul et mesure traditionnelle d'une ligne, on atteint usuellement une différence de l'ordre de 3% pour les composantes directes et jusqu'à 15% pour les composantes homopolaires [2]. On constate ci-dessus une certaine variabilité des mesures. La résistance ne présente par hasard aucune différence alors qu'elle est

dans cette méthode le paramètre le plus sensible (température, vent, extraction mathématique). L'avantage de cette méthode est toutefois sa simplicité.

Lignes longues, lignes courtes

Les mesureurs de phaseurs étant précis, il est recommandé d'introduire la notion de ligne courte ou longue pour tenir compte du temps de propagation du signal. L'équation des télégraphistes appliquée dans le cas d'une ligne longue mène

à des équations où il devient nécessaire de faire une simplification pour pouvoir extraire les paramètres de la ligne par la méthode des phaseurs. Une application a permis de connaître les conséquences de cette simplification et de valider la méthode.

Résumé

En résumé, l'extraction de la composante directe des impédances et admittances équivalentes des lignes peut être

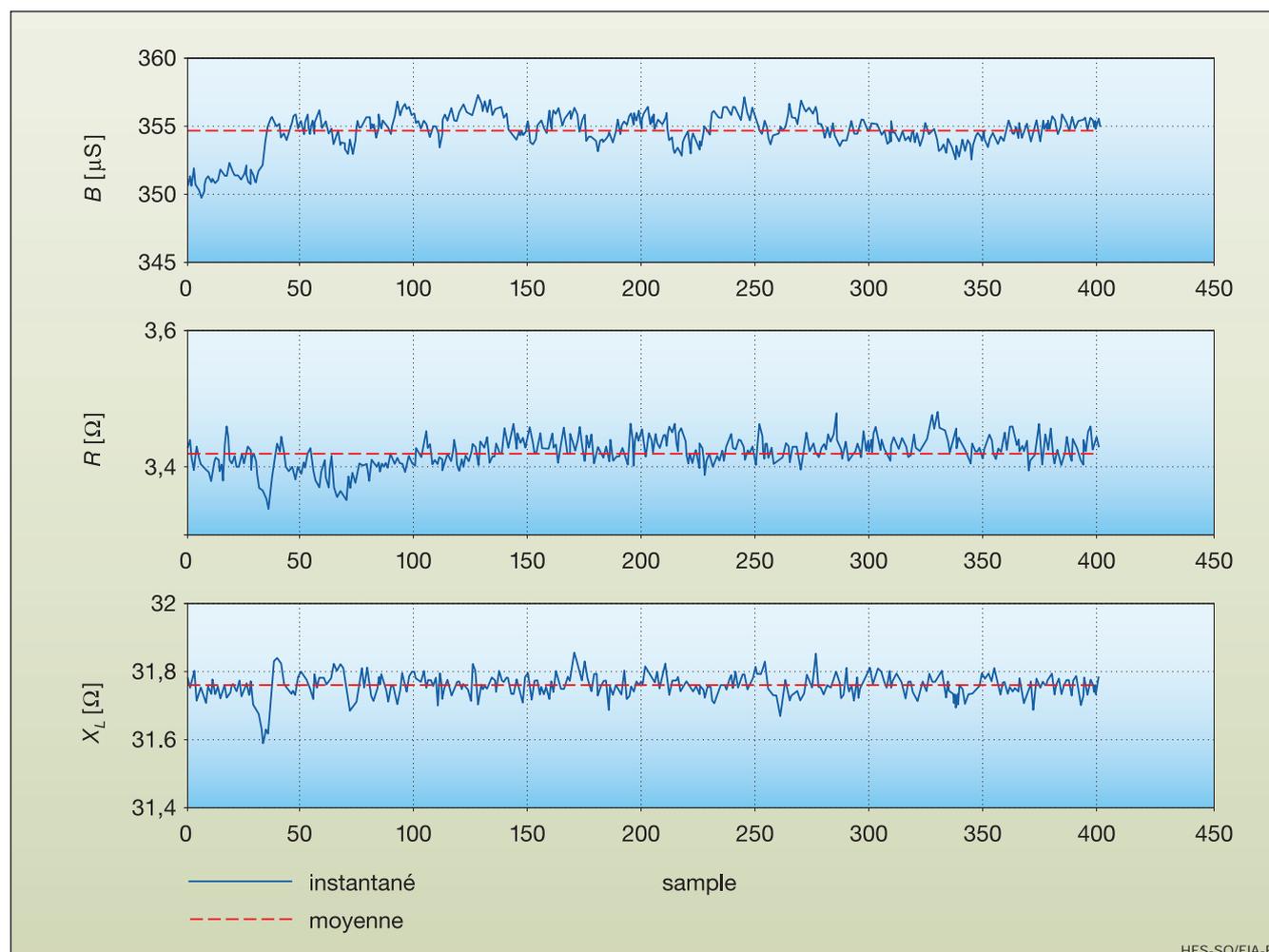


Figure 5 Paramètres de ligne obtenus avec des mesureurs de phaseurs



Figure 6 Mesureurs de phaseurs connectés au simulateur analogique et au système de surveillance globale («WAMS»)⁴⁾

réalisée avec des mesureurs de phaseurs. La composante homopolaire nécessite elle une charge temporairement (typiquement quelques secondes, le temps de rafraîchissement d'un mesureur de phaseur étant d'environ 100 ms) non symétrique, dont avec au minimum une composante homopolaire. Pour des lignes de longueur supérieure on peut relativement facilement tenir compte du temps de propagation.

Autres applications des phaseurs

Parmi les applications multiples des phaseurs, on peut relever :

- L'analyse des répartitions de puissances de charge.
- La détection et l'analyse des courts-circuits.

- L'analyse rapide des risques de congestion.
- L'aide à la gestion des congestions.
- L'analyse rapide des premières oscillations à basse fréquence.
- L'analyse rapide des instabilités de fréquence.
- L'analyse rapide des instabilités de tension.

Tous ces cas ont fait l'objet de calculs [3] et de démonstrations sur un simulateur analogique. Ces résultats ont été enregistrés, voire filmés pour les cas d'instabilité.

On remarquera dans le cas d'analyse des répartitions de puissances de charge que l'utilisation des phaseurs offre une grande similitude avec les algorithmes de calcul (exécutés le plus souvent avec les nombres complexes). Cela mène également à de nouvelles vues pour les estimateurs d'état [4], alors qu'aujourd'hui, la connaissance unique du module détermine encore fortement l'algorithme.

Tous ces cas appliqués sur simulateur analogique ne sont pas négligeables dans le cadre d'une formation de futurs ingénieurs. Ces derniers habitués aux nombres complexes se retrouvent mieux dans cet environnement (figure 6). La compréhension de phénomènes de courts-circuits ou de régimes instables avec la présence d'une ou plusieurs machines synchrones est fortement facilitée. Le paragraphe suivant entre plus dans les détails pour le cas de la gestion des congestions.

Exemple de gestion des congestions

On choisit un corridor à 3 lignes en parallèle dans le simulateur (figure 7), en profitant de la présence d'un 1^{er} FACTS du type UPFC et d'un 2^{ème} FACTS du type transformateur déphaseur.

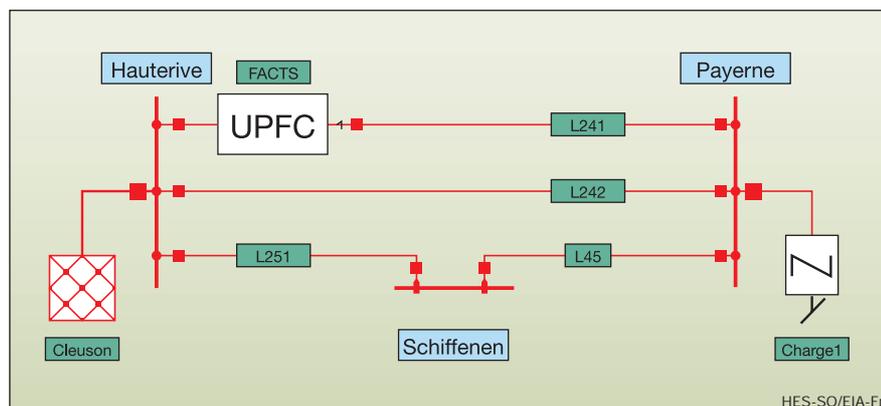


Figure 7 Topologie choisie dans le simulateur analogique

FACTS du type UPFC

L'UPFC a les caractéristiques suivantes: 60 V/3×400 V/7,5 A triphasé [5].

Il peut être réglé en boucle ouverte (introduction d'une source de tension), en compensateur de réactif (consommation ou génération de puissance réactive, SVC «Static Var Compensator») ou en boucle fermée (imposition dans la branche de l'UPFC d'un transit de puissance $S = P + jQ$). La figure 8 présente la position de fonctionnement de l'UPFC en boucle fermée.

Corridor à 3 lignes avec une ligne en panne et un UPFC

Le tableau II présente les puissances actives dans les 3 lignes enclenchées sans UPFC puis avec la ligne L242 déclenchée avec et sans UPFC dans la ligne L241.

Dans la 1^{ère} et dans la 2^{ème} colonne, on remarque une répartition des puissances selon les impédances en jeu. Dans la 3^{ème} colonne, l'UPFC a équilibré les flux.

Corridor à 3 lignes équipé de 2 FACTS

Le tableau III présente les puissances actives dans les 3 lignes enclenchées avec 3 cas de marche:

- Seul un transformateur déphaseur (Phase Shifting Transformer) «esclave» est mis en route dans la ligne L251.
- Une valeur faible de transit est donnée pour consigne à l'UPFC «maître» pour la ligne L241.
- La consigne à l'UPFC pour la ligne L241 est fortement augmentée.

En résumé, on peut remarquer la soumission du transformateur déphaseur (esclave) à l'UPFC (maître). Ce dernier a en effet reçu le rôle de chef. Ce simple exemple montre le besoin d'un chef d'orchestre pour gérer de multiples FACTS dans les cas de corridors avec risque de congestion. Dans le cas contraire, les 2 FACTS pourraient travailler l'un contre l'autre s'ils sont proches l'un de l'autre [6, 7].

Tous ces cas de marche ont été enregistrés et confirmés par calcul à l'aide d'un logiciel⁵⁾.

Conclusions

L'utilisation de mesureurs de phaseurs dans les nœuds d'un vaste réseau électrique a des avantages qui commencent déjà lors de la formation des ingénieurs (application des nombres complexes dans les exercices pratiques en laboratoire). Ces avantages continuent avec la gestion des risques de congestion et le rétablisse-

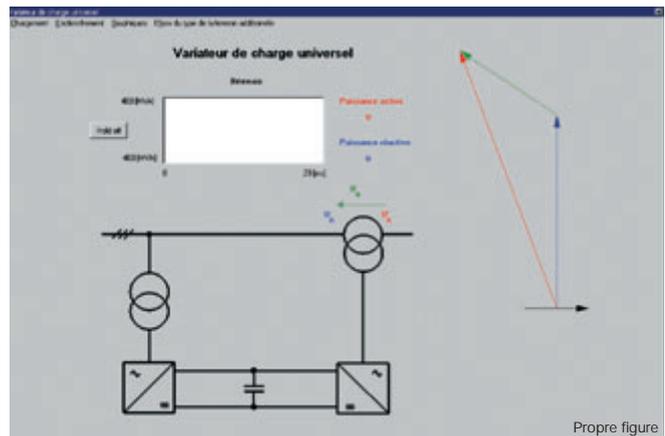
ment des réseaux en état critique. Le rapport de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN, [8]) montre par exemple l'évolution de l'angle entre les 2 extrémités de la ligne du Lukmanier lors de la coupure du 28 septembre 2003 (tableau IV). La connaissance en temps réel (domaine de la seconde) de cet angle serait un avantage évident pour la conduite des réseaux.

Ce projet a aussi permis le développement de nouveaux concepts, utiles à l'enseignement de l'énergie électrique dans la HES-SO; il est en effet bénéfique de pouvoir former les futurs ingénieurs aux nouvelles contraintes et possibilités qui apparaissent dans les réseaux de transport et distribution.

Références

- [1] J. Bertsch, M. Zima, C. Carnal, A. Suranyi, N. Singh, W. Sattinger: New experience and perspectives of wide area monitoring system. Cigré Conference, Montreal 2003.
- [2] V. Jotterand: Mesure automatisée des caractéristiques d'une ligne électrique. Rapport de projet de diplôme, Ecole d'Ingénieurs du canton de Vaud, 1999.
- [3] D. Progin, P. Chassot: Gestion d'un réseau équipé d'un régulateur de flux. Rapport de projet de diplôme, Ecole d'Ingénieurs et d'Architecte de Fribourg, 2003.
- [4] D. Westermann, H. Sauvain: Experience with Wide Area Monitoring and Facts Control in a Real Time Simulator. PowerTech, St Petersburg, 2005.
- [5] M. Pellerin: Démonstrateur pour FACTS. Conférence EPF, Montpellier, 2002.
- [6] A. Oudalov, R. Cherkaoui, A. Germond, M. Emery: Coordinated Power Flow Control by Multiple FACTS Devices, PowerTech, Bologna, 2003.
- [7] S. Gerbex, R. Cherkaoui, A. Germond: Optimal Location of FACTS Devices to Enhance Power System Security. PowerTech, Bologna 2003.

Figure 8 Ecran de contrôle du FACTS (UPFC) dans le simulateur analogique



- [8] R. Bacher, U. Näf, M. Renggli, W. Bühlmann : Rapport concernant la panne de courant survenue en Italie le 28 septembre 2003. Office fédéral de l'énergie (OFEN), 2003.

Informations sur les auteurs

Hubert Sauvain est ingénieur-électricien diplômé en 1974 de l'EPFL. Il a travaillé pour plusieurs sociétés en Suisse et à l'étranger. Il est aujourd'hui professeur à la HES-SO/EIA-Fr à Fribourg.
HES-SO/EIA-Fr, CH-1705 Fribourg,
hubert.sauvain@hefr.ch.

Jean-François Affolter est ingénieur M.Eng en énergie électrique. Il a obtenu son diplôme de l'Université McMaster (CDN) en 1987. Après une première expérience en câblerie et un séjour aux Ontario Hydro, il a travaillé durant de nombreuses années au service exploitation de l'Energie Ouest Suisse (EOS). Il est aujourd'hui professeur à la HES-SO/EIVD à Yverdon-les-Bains.
HES-SO/EIVD, CH-1401 Yverdon-les-Bains,
jean-francois.affolter@eivd.ch

Dr. **Joachim Bertsch** a achevé en 1992 ses études d'électrotechnique à l'Université de Stuttgart et obtenu le diplôme d'ingénieur. Par la suite, il a passé son

doctorat à l'Institut de transport d'énergie et de technique haute tension de l'Université de Stuttgart en 1995. En 1995 également, il est entré au service d'ABB à Baden en qualité d'ingénieur de développement pour systèmes de protection numériques. Depuis 2004, il enseigne les systèmes énergétiques et l'électrotechnique à la Haute Ecole Technique de Rapperswil. Chez ABB, il est actuellement responsable de la recherche et du développement de «Wide Area Measurement and Control Systems».
ABB Schweiz AG, Utility Automation Systems,
CH-5400 Baden, joachim.bertsch@ch.abb.com

¹ Ces applications citées dans cet article ont été effectuées dans le cadre du travail de diplôme [3] par Pierre-Antoine Chassot et Dominique Progin. L'ensemble du projet exécuté en collaboration avec ABB a été soutenu financièrement par la CTI à Berne (<http://www.bbt.admin.ch/kti/aufgaben/e/index.htm>). Le simulateur a été offert par les sociétés EOS et EEFENSA. Nous remercions également la société Etrans AG pour nous avoir fourni des données relatives à une ligne à haute tension.

² FACTS: Flexible Alternative Current Transmission System

³ UPFC: Uniform Power Flexible Converter

⁴ <http://www.abb.com/poweroutage>

⁵ <http://www.neplan.ch/>