



Dynamique du prix de l'énergie sur un réseau de distribution: Approche par modèle de Ising

Yves Heri

► To cite this version:

Yves Heri. Dynamique du prix de l'énergie sur un réseau de distribution: Approche par modèle de Ising. A paraître. <hal-02984497>

HAL Id: hal-02984497

<https://hal.science/hal-02984497v1>

Preprint submitted on 4 Nov 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Dynamique du prix de l'énergie sur un réseau de distribution: Approche par modèle de Ising

Yves HERI¹

¹ Département de Génie Electrique, Université de Lubumbashi, Congo (RD)

E-mail: yvesheri@gmail.com

Résumé

L'intégration accrue des énergies renouvelables décentralisées dans les réseaux de distribution a amené différents défis dans l'analyse et la planification des réseaux électriques. Le gestionnaire du réseau doit disposer d'outils adaptés permettant une prise de décision rapide et une facturation/rémunération équitable des consommateurs/producteurs. Dans cet article, nous introduisons une nouvelle approche basée sur le célèbre modèle de Ising afin de modéliser la variation du prix de l'énergie réactive circulant sur un réseau de distribution en fonction des interactions locales entre abonnés mais également en fonction de l'état général du réseau. Une simulation sur le réseau Test du CIGRE nous a permis de quantifier le bénéfice qu'un gestionnaire de réseau aurait en utilisant la stratégie de facturation proposée

Mots-clés: Modèle de Ising ; Réseau de distribution

1. Introduction

L'augmentation de l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux électriques amène une nouvelle dynamique dans le fonctionnement de ces derniers. Les abonnés qui étaient jusqu'à présent passifs dans la régulation du fonctionnement du réseau sont alors devenus actifs pouvant fournir ou consommer de l'énergie sur le réseau [1,2].

Un effet notable de l'intégration des énergies renouvelables est l'augmentation significative de l'échange d'énergie réactive sur les réseaux poussant ainsi les opérateurs (DSO : Distribution System Operator) à revoir leurs modèles de facturation sur l'échange de cette énergie [3,4]. Le maintien de la tension sur les nœuds dépend de la compensation de l'énergie réactive faite par l'abonné actif (agent), le DSO peut rétribuer ou charger l'agent selon qu'il fournit ou consomme de l'énergie réactive sur le réseau.

Dans [5 – 7] on retrouve plusieurs approches permettant de modéliser le prix de l'énergie, on remarque que ces travaux se basent soit sur une vision singulière de l'agent soit sur une vision globale du réseau.

Dans cet article nous concilions ces deux visions précédentes en établissant un modèle de prix considérant les

interactions entre agents devant mener à une configuration globale sur le réseau, nous nous basons sur un modèle bien connu en physique statistique à savoir le modèle de Ising.

2. Revue de littérature

Plusieurs travaux ont étudié les phénomènes économiques sous la lumière de la physique statistique en construisant des modèles qui révèlent les effets des interactions locales des agents sur la structure globale du marché [8 – 11]. Cont et Bouchaud (CB) ont créé un des modèles les plus simples de marché financier fournissant des prédictions intéressantes sur l'origine microscopique des phénomènes macroscopiques tels que les crashes, les bulles [12]. La structure de leur modèle est proche d'un modèle de percolation [13,14]. Une reformulation du modèle CB peut être trouvée dans [13] incluant la notion de super-spin afin d'étudier l'évolution dans le temps de la structure générale du marché. Tandis que dans [15] le modèle CB est modifié pour intégrer une hiérarchisation des agents.

Une autre approche recourant à la physique statistique est introduite par Bornholdt [16,17]. Ici il utilise le bien célèbre modèle d'Ising [18 – 20] afin de modéliser l'interaction entre les agents les plus proches et l'action de la structure générale du marché sur un agent. Le modèle de

Bornholdt (BI : Bornholdt – Ising) a valablement prédit plusieurs faits stylisés telles que la volatilité ou la distribution de la variation relative du prix [9]. Sieczka et Holyst ont modifié le modèle de Bornholdt afin d'affiner ses prédictions en changeant la dynamique de l'agent tenant compte de l'opinion de ce dernier [21].

Nous n'avons retrouvé dans la littérature qu'une seule application du modèle de Ising sur les réseaux électriques [23] qui aborde la notion de flexibilité.

Nous allons construire dans ce travail, un modèle BI sur un réseau de distribution électrique ; de ce modèle nous étudierons la dynamique du prix de l'énergie réactive. Dans la section 3 de cet article, nous présenterons le modèle de réseau électrique, il suivra dans la section 4 la présentation du fonctionnement de l'agent actif et du mécanisme de facturation. La section 5 donnera l'application du modèle BI sur le réseau électrique. Puis viendront les résultats des simulations dans la section 6 avant de conclure.

3. Structure du réseau

Nous considérons, un réseau électrique de distribution ayant N -nœuds sous forme d'un graphe non dirigé $G = (\mathcal{V}_N, \mathcal{L})$ où \mathcal{V}_N est l'ensemble des nœuds et \mathcal{L} l'ensemble des lignes entre ces nœuds. Les nœuds sont dénommés par l'indice $i = 0, 1, \dots, N - 1$. S'il existe une ligne entre les nœuds i et j , on notera $(i, j) \in \mathcal{L}$. Les lignes sont considérées pour notre étude comme ayant des admittances très proches de telle sorte que l'on peut considérer qu'il existe une base telle que $y_{ij} \approx 1 \text{ pu}, \forall (i, j) \in \mathcal{L}$. Cette hypothèse est vraisemblable pour la plupart des réseaux urbains de distribution [26]. A chaque nœud i correspond un vecteur \underline{x}_i donnant l'état du nœud,

$$\underline{x}_i = \begin{pmatrix} U_i \\ Q_i \end{pmatrix} \quad (1)$$

Où U_i et Q_i sont respectivement la tension et la puissance réactive sur le nœud i .

Des équations de *Loadflow*, on peut remarquer une connexion entre la tension et le flux d'énergie réactive sur un nœud [27,28]. De telle sorte que l'on peut dire qu'une production d'énergie réactive cause une augmentation de la tension, tandis qu'une consommation d'énergie réactive tend à abaisser la tension (figure 1). Ainsi un agent actif peut réguler la tension sur son nœud selon qu'il produit ou consomme une quantité donnée d'énergie réactive (Méthode RPC : Reactive Power control) [28].

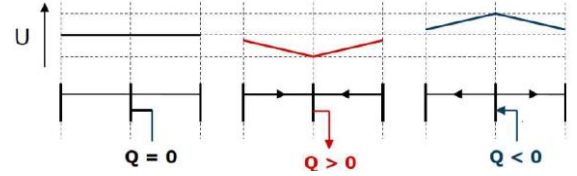


Figure 1 – Variation de tension en fonction du sens de l'énergie réactive [3]

4. L'agent actif

Un agent actif situé au nœud i est un abonné ayant la possibilité de produire ou de consommer de l'énergie réactive sur le réseau afin de maintenir la tension (U_i^k) à son nœud dans une certaine marge de tolérance autour d'une tension de référence (U_r) fixée par le DSO avec k qui représente un intervalle de temps [3]. Son fonctionnement peut se résumer comme ceci : si $U_i^k < U_r$ et que $Q_i < 0$ (producteur), le DSO paie l'agent pour la quantité d'énergie qu'il fournit tandis que si $U_i^k > U_r$ et que $Q_i < 0$, l'agent est facturé car le surplus d'énergie réactive qu'il produit viendra déstabiliser le réseau, etc. Sur la figure 2, les zones de fonctionnement à savoir la zone de cout et la zone de bénéfice sont reprises. U_{tol} est la tolérance sur la mesure de la tension U_i^k . Un plus large exposé peut être trouvé dans les travaux de Fetzner [3].

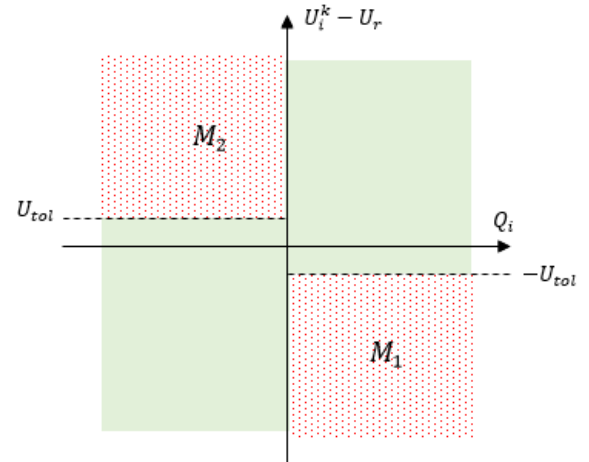


Figure 2 – Zones de fonctionnement de l'agent actif

La zone de cout (en rouge sur la figure 2) est la zone $\mathcal{M} = \mathcal{M}_{1i} \cup \mathcal{M}_{2i}$ telle que :

$$\mathcal{M}_{1,i} \stackrel{\text{def}}{=} \{ \underline{x}_i \in \mathbb{R}^2 \mid Q_i > 0, U_i^k - U_r < -U_{tol} \} \quad (2)$$

Et

$$\mathcal{M}_{2,i} \stackrel{\text{def}}{=} \{ \underline{x}_i \in \mathbb{R}^2 \mid Q_i < 0, U_i^k - U_r > U_{tol} \} \quad (3)$$

Si le point de fonctionnement de l'agent se trouve dans la zone \mathcal{M} , l'agent doit payer un prix $\mathcal{C}(t)$ par unité

d'énergie consommée, sinon il est payé au prix $\mathcal{B}(t)$ par unité d'énergie fournie. Dans ce travail nous considérons une tarification identique $\mathcal{P}(t)$ dans les deux cas tel $\mathcal{P}(t) = \mathcal{C}(t) = \mathcal{B}(t)$.

Ainsi le prix que l'agent paie ou est payé est donné par

$$\text{prix} = \begin{cases} \mathcal{P}(t), & \forall \underline{x}_i \in \mathcal{M} \\ -\mathcal{P}(t), & \forall \underline{x}_i \notin \mathcal{M} \end{cases} \quad (4)$$

On peut considérer ainsi l'agent comme ayant deux modes de fonctionnement à savoir acheteur ou vendeur. On appellera le mode de fonctionnement de l'agent '*spin*' et on associe à chaque spin un signe. Nous retenons la convention reprise dans [16] telle que si l'agent est en mode acheteur son spin sera égal à $+1$, s'il est en mode vendeur son spin sera -1 . Cette considération ramène notre système vers un modèle de Ising [16 – 18].

5. Application du modèle de Ising au réseau de distribution

Nous allons formaliser à présent la démarche permettant d'établir le spin de l'agent selon son point de fonctionnement. On considère une fonction d'appartenance $f_i(\underline{x}_i)$ tel que

$$\begin{cases} f_i(\underline{x}_i) < 0, & \forall \underline{x}_i \in \mathcal{M} \\ f_i(\underline{x}_i) > 0, & \forall \underline{x}_i \notin \mathcal{M} \end{cases} \quad (5)$$

Dans [3], l'auteur remarque que la fonction suivante reprend cette propriété

$$f_i(\underline{x}_i) = \frac{Q_i}{|Q_i|} (U_i^k - U_r) + U_{tot} \quad (6)$$

Le spin $\sigma_i(\underline{x}_i)$, qui renseigne sur le mode de fonctionnement de l'agent est donné par

$$\sigma_i(\underline{x}_i) = \begin{cases} +1, & \forall \underline{x}_i \in \mathcal{M} \text{ (mode acheteur)} \\ -1, & \forall \underline{x}_i \notin \mathcal{M} \text{ (mode vendeur)} \end{cases} \quad (7)$$

Des relations (5) et (6), on peut considérer le spin comme l'opposé du signe de la fonction $f_i(\underline{x}_i)$ soit

$$\sigma_i(\underline{x}_i) = -\text{signe}(f_i(\underline{x}_i)) \quad (8)$$

De cette relation, il est aisé de faire un pont entre les paramètres électriques des nœuds du réseau et la configuration d'un modèle de Ising. Nous nous basons sur les travaux de Bornholdt [16, 17] qui construit un modèle de Ising applicable à un marché financier. On appelle configuration du modèle de Ising un élément $\omega \in \Omega_N \stackrel{\text{def}}{=} \{-1, +1\}^{\mathcal{V}_N}$; Ω_N est l'espace de

configuration, une variable $\sigma_i: \Omega_N \rightarrow \{-1, +1\}$, $\sigma_i(\omega) \stackrel{\text{def}}{=} \omega_i$ est appelée spin de au sommet i du graphe considéré.

A chaque sommet i du graphe du réseau on définit la grandeur $\mathcal{H}_i(t)$ appelée champ local.

$$\mathcal{H}_i(t) = \sum_{j=1}^N J_{ij} \sigma_j - \alpha \sigma_i \left| \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sigma_j \right| \quad (9)$$

De cette expression $J_{ij} = 1 \forall (i, j) \in L$ et $J_{ij} = 0$ sinon. α est un paramètre couplant le champ local avec l'état globale du réseau. On comprend que le champ local sur un agent i dépend de :

- i. l'état de ses voisins directs, on peut considérer ceci comme étant une conséquence du théorème de Millmann ;
- ii. l'état général du réseau, donné par le paramètre $\mathcal{D}(t)$ appelé aimantation

$$\mathcal{D}(t) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sigma_j \quad (10)$$

La probabilité $\mu_{i,\beta}$ de transition locale (le basculement) d'un spin en fonction de l'état de ses voisins définit la dynamique même du spin, une revue des différentes dynamiques possibles peut être trouvée dans [30]. Dans le modèle BI on considère une dynamique Heat –Bath (Bain thermique).

$$\mu_{i,\beta}(\sigma_i = 1 | \sigma_j = \omega_j, \forall (i, j) \in \mathcal{L}) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{1 + \exp(-2\beta \mathcal{H}_i(\omega))} \quad (11)$$

$\beta \in \mathbb{R}^+$ est appelé température inverse.

Par l'hypothèse des marchés financiers efficients on peut considérer que le prix $\mathcal{P}(t)$ est fonction de l'état globale du marché ici quantifié par l'aimantation $\mathcal{D}(t)$ [13,16]. Sieczka et Holyst [21] puis Denys, Gubiec et Kutner [31], considèrent l'expression suivante comme étant une bonne approximation

$$\mathcal{P}(t) = P_0 \exp(\mathcal{D}(t)) \quad (12)$$

Avec P_0 le cout à l'équilibre. On peut considérer la variation relative du prix sur une période τ par

$$r(t) = \ln \frac{\mathcal{P}(t)}{\mathcal{P}(t-\tau)} = \mathcal{D}(t) - \mathcal{D}(t-\tau) \quad (13)$$

Ces deux expressions définissent toute la dynamique du prix de l'énergie. De l'expression (12), nous établissons que le cout total du flux d'énergie réactive sur un réseau peut s'exprimer à l'instant t par

$$\mathcal{C}_{TOT}(t) = \sum_{i=1}^N |Q_i| \mathcal{P}(t) \sigma_i(t) \quad (14)$$

6. Simulation et discussion

Nous allons tester notre modèle sur le réseau test du CIGRE modifié (figure 3), ce réseau possède 18 nœuds actifs, les paramètres de ce réseau sont identiques à ceux utilisés dans [28]. Pour simulation nous affectons de manière aléatoire uniforme à chaque nœud une puissance active comprise entre 18 et 4 kW sous un facteur de puissance de 0,9. On considère également que chaque agent peut fournir ou consommer uniquement 10% de sa puissance réactive nominale. La simulation est faite sur 24 heures dans un intervalle de 15 minutes. Les paramètres α et $\beta \in \mathbb{R}^+$ du modèle de Ising sont respectivement 8 et 1 [16].

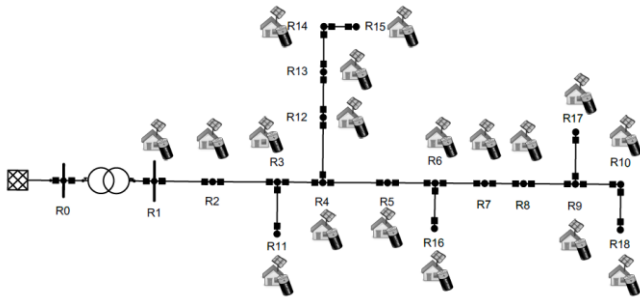


Figure 3 – Le réseau test CIGRE modifié [28]

L'algorithme *Heat-Bath* (Bain thermique) est utilisé pour la simulation, c'est un algorithme du type Monte-Carlo. Dans celui-ci on passe d'une configuration ω vers une autre configuration ω' de la façon suivante : on tire un nombre $u \in [0, 1]$ selon une probabilité uniforme, et un sommet $i \in \mathcal{V}_N$ également de façon uniforme. On pose alors

$$\omega'_j = \begin{cases} \omega_j & \text{si } i \neq j \\ +1 & \text{si } u \leq \mu_{i,\beta}(\sigma_i = 1 | \sigma_j = \omega_j, \forall (i,j) \in \mathcal{L}) \\ -1 & \text{si } u > \mu_{i,\beta}(\sigma_i = 1 | \sigma_j = \omega_j, \forall (i,j) \in \mathcal{L}) \end{cases} \quad (15)$$

La simulation du modèle de Ising sur le réseau affecte aléatoirement différents spins aux nœuds du réseau, notre simulation étant faite sur 24h à intervalle de 15 minutes. Nous obtenons ainsi 96 états simulés. Nous montrons à la figure 4 trois de ces états du réseau obtenus lors de la simulation du modèle de Ising.

Sur la figure 5, nous montrons la variation de l'aimantation $\mathcal{D}(t)$ dans le temps, il y majoritairement déséquilibre entre le nombre d'acheteurs et le nombre de vendeurs sur le réseau. L'effet de la variation de l'aimantation sur le prix $\mathcal{P}(t)$ est perceptible, impliquant que s'il y a plus acheteur sur le réseau le prix de l'énergie augmente et à l'inverse s'il y a plus de vendeur le prix diminue. Nous

comparons cette variation du prix par rapport à un prix de référence fixe P_0 par simplification ce prix est maintenu 1 unité monétaire. Le cout total de l'énergie en considérant un prix dynamique est plus faible soit environ - 0,1769 unité monétaire que dans le cas d'un prix fixe ou nous avons - 0,6160 unité monétaire.

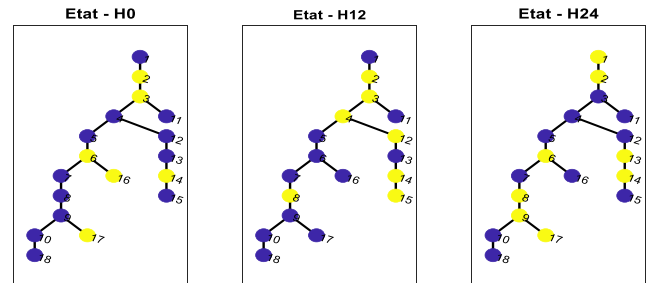


Figure 4 – Variation de l'état des nœuds (agents) lors de la simulation du modèle de Ising

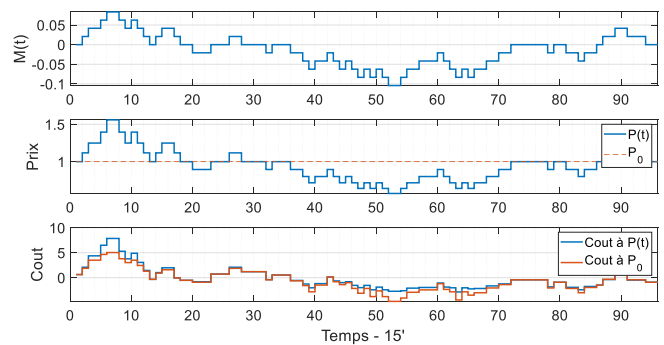


Figure 5 – Variation temporelle – de l'aimantation – du prix – du cout

Sur la figure 6 nous présentons la distribution de la variation relative du prix pour différentes valeurs de τ . On remarque un aplatissement de la distribution suivant l'augmentation de τ . Cette observation montre la validité du modèle [8, 9, 13, 21, 31]. En considérant τ allant de 1 à 4 nous analysons la variation du prix respectivement sur 15, 30, 45 et 60 minutes.

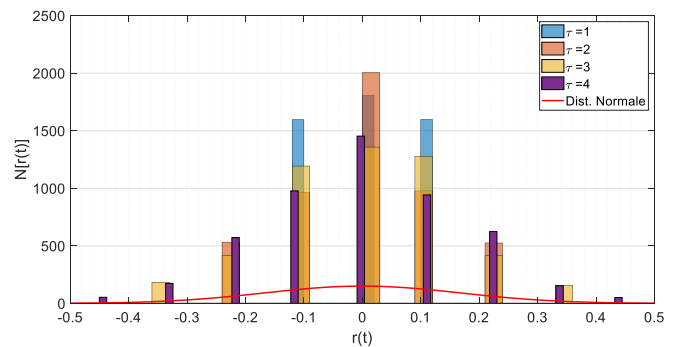


Figure 6 –Histogramme de $r(t)$ pour τ 1 à 4

La figure 7 montre un aperçu général de la simulation, reprenant la variation de l'état de chaque agent, la variation de la puissance consommée ainsi que la variation du cout/bénéfice de chaque agent.

Quelques observations importantes peuvent être tirées de ces résultats :

- On remarque de la méthode de tarification proposée que le prix reste supérieur au prix fixe si il y a plus d'acheteurs que de vendeurs dans et il est inférieur au prix fixe s'il y a plus de vendeurs que d'acheteurs (cfr. Figure 5b).
- Cette tarification augmente les bénéfices du DSO et diminue ses pertes (cfr. Figure 5c).

7. Conclusion

La simulation d'un modèle de Ising sur le réseau de distribution test du CIGRE démontre qu'une facturation dynamique de l'échange d'énergie réactive entre les agents actifs du réseau et le DSO permet une diminution du cout total de l'énergie cela en comparaison avec une facturation à prix fixe. L'état de chaque agent ainsi que l'état général du réseau pouvant être connus à travers les smart-meters, le DSO peut ainsi adapter le prix de l'énergie sur un intervalle donné.

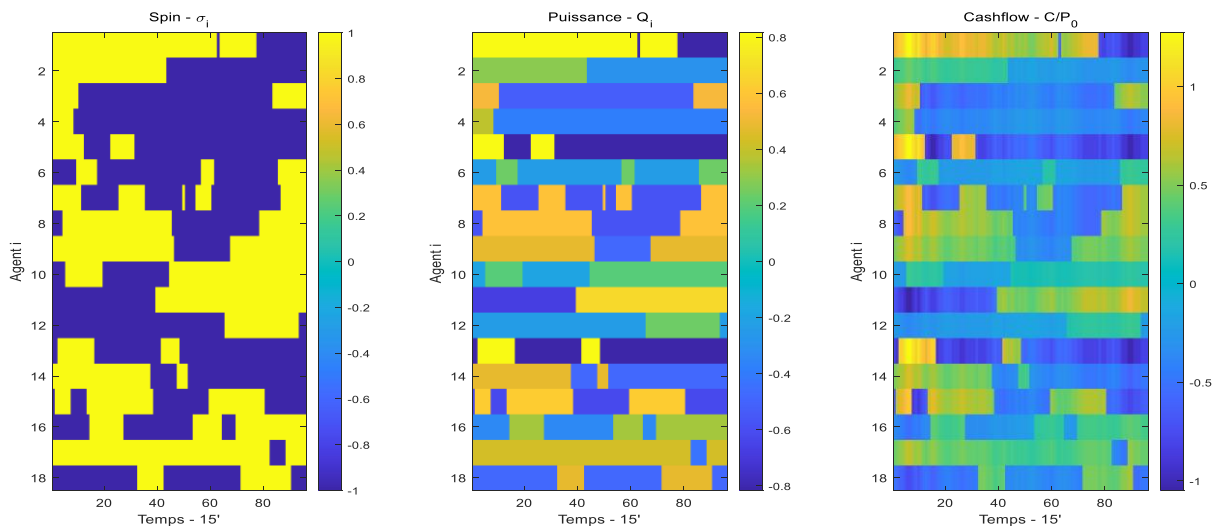


Figure 7 – Variation temporelle pour chaque agent – de l'état – de la puissance réactive – cout/bénéfice

Références

- [1] P. Fortenbacher, M. Zellner, and G. Andersson, "Optimal sizing and placement of distributed storage in low voltage networks," in 19th Power Systems Computation Conference, Genoa, Italy, 2016.
- [2] R. Sims et al, Integration of Renewable Energy into Present and Future Energy Systems, ser. IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Cambridge University Press 2011.
- [3] M. Fetzner, Cost Cost-optimized Voltage Control in Distribution Networks. Master thesis, ETH 2016.
- [4] Swissgrid. Tarife, 2020. Available: https://www.swissgrid.ch/dam/swissgrid/experts/grid_usage/Tabelle_Tarife_de.pdf.
- [5] MC. Hildmann Quantitative methods for the economic analysis of liberalized power markets. Doctoral thesis, ETH 2014
- [6] J. Muller, M. Hildmann, A. Ulbig, G. Andersson, Grid Integration Costs of fluctuating Renewable Energy Sources 2nd IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech), Portland, OR, USA 2014.
- [7] M. Hildmann, A. Ulbig, G. Andersson Modeling of Merit Order Curve of the European Energy Exchange Market in Germany, IEEE Transactions on Power Systems.
- [8] T. Takaishi Multiple Time Series Ising Model for Financial Market Simulations, International Journal Mod. Phys. C 16, 1311 2005.
- [9] T. Kaizoji, S. Bornholdt, Y. Fujiwara, Dynamics of price and trading volume in a spin model of stock markets with heterogeneous agents Phys. A 316, 441 2002.

- [10] LR. da Silva, D. Stauffer, Ising-correlated clusters in the Cont-Bouchaud stock market model, *Physica A* 294 235–238 2001
- [11] P. Bak, SF. Nørrelykke and Martin Shubik, The Dynamics of Money, arXiv:cond-mat/9811094v2 [cond-mat.stat-mech] 25 May 1999
- [12] R. Cont, JP Bouchaud, HERD BEHAVIOR AND AGGREGATE FLUCTUATIONS IN FINANCIAL MARKETS, *Macroeconomic Dynamics*, 4, 170–196, 2000.
- [13] D. Chowdhury, D. Stauffer, A generalized spin model of financial markets, *THE EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL B*, 477 – 482, 1999.
- [14] D. Stauffer, A. Aharony, *Introduction to Percolation Theory*, Taylor and Francis, London, 1994.
- [15] R. Paluch, K. Suchecki and JA. Holyst Hierarchical Cont-Bouchaud model, arXiv:1502.02015v1 [physics.soc-ph] 6 Feb 2015
- [16] S. Bornholdt Expectation bubbles in a spin model of markets: Intermittency from frustration across scales, arXiv:cond-mat/0105224v2 [cond-mat.stat-mech] 16 May 2001
- [17] S. Bornholdt, F. Wagner, Stability of money: Phase transitions in an Ising economy, arXiv:cond-mat/0110201v1 [cond-mat.stat-mech] 10 Oct 2001
- [18] BM. McCoy, Tai Tsun Wu, *The Two-Dimensional Ising Model*, Dover Publications, Inc. Mineola, New York 2014
- [19] G. Grimmett, *The Random-Cluster Model*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006
- [20] HO. Georgii *Gibbs Measures and Phase Transitions*, Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, Berlin/New York, 2011
- [21] P. Sieczka, JA. Holyst, A threshold model of financial markets, arXiv:0711.3106v3 [q-fin.ST] 24 Jun 2008
- [22] AR. Hernandez-Montoya, HF. Coronel-Brizio, A. Aguilar-Salas and N. Bagatella-Flores, On Ising spin models and statistical wealth condensation: Generating a wealth-like distribution, *Revista Mexicana de Física S* 58 (1) 110–115
- [23] F. Prieto-Castrillo, AS. Gzafroudi, J. Prieto and JM. Corchado, An Ising Spin-Based Model to Explore Efficient Flexibility in Distributed Power Systems, *Hindawi Complexity* Volume 2018, Article ID 5905932, 16 pages
- [24] M. Levy, H. Levy, and S. Solomon, A microscopic model of the stock market: Cycles, booms and crashes, *Economics Letters* 45 (1994) 103-111.
- [25] M. Youssefmir and B. Huberman, Clustered volatility in multiagent dynamics, *J. Economic Behavior and Organization* 32 (1997) 101-118.
- [26] Benchmark systems for network integration of renewable and distributed energy resources, Cigre Task Force C6.04.02, Tech. Rep., 2014. [Online]. Available: <http://c6.cigre.org/Publications/Technical-Brochures>
- [27] G. Duncan, S. Mulukutla, and T. Overbye. *Power system analysis and design*. CENGAGE Learning, 2012.
- [28] C. Bucher, *Analysis and simulation of distribution grids with photovoltaic*, Doctoral thesis ETH 2014
- [29] J. M. Luck, *Systèmes Désordonnés Unidimensionnels* (Alea-Saclay, 1992).
- [30] AM. Marizt, HJ. Herrmann Mixing heat-bath and Glauber dynamics: damage spreading in the Ising model *J. Phys. A: Math. Gen.* 22 (1989) L1081-L1084.
- [31] M. Denys, T. Gubiec, R. Kutner, Reinterpretation of Sieczka-Holyst financial market model, arXiv:1301.2535v1 [q-fin.ST]