

計測自動制御学会東北支部第 175 回研究集会(1998.6.19)

資料番号 175-13

## 規制緩和時代の電力システム分野の課題と知能工学手法

Topics in Power System Engineering after Deregulation  
and Application of Intelligence Engineering

豊田 淳一、八戸工業大学\*

J.Toyoda, Hachinohe Institute of Technology

## 1. グローバルに広がる規制緩和の波

電力流通の設備利用を一般に開放する、送電ネットワークのコモンキャリア化の動きは先進諸国に共通してみられる。規模と範囲の経済にもとづいて拡大発展してきた電気事業が、立地用地確保の困難、環境規制、安い電力や料金の透明性を求める消費者インセンティブなどに直面して、変革を迫られてきたということであろう。

日本では、1995 年電気事業法の改正により独立系発電会社 (IPP) が電気事業の発電部門に参入できることになった。1996 年の新規電源の公募 (全国合計 2655MW) に対して、3~5 倍の応募があり、入札価格がその上限を 10~30%程度下回ったことなど大きな話題になった。

アメリカでは、1996 年に送電サービスを一般に開放するよう決めたルール No. 888 と No. 889 が FERC (連邦エネルギー規制委員会) により公布された。現実の電力システムにおいて、大幅に自由化された電力取引をどのように物理的に実現させるかが重要な課題であり、NERC (北米信頼度協議会) と EPRI (米国電力研究所) を中心にして実行案が検討され施行に向けて準備が進められている。ヨーロッパでは、1990 年イギリスでは発送配電事業を垂直分割して電気事業の民営化が始まり、1995 年には UNIPED と CENTREL の同期連系が成功して中欧も含めたヨーロッパ電力単一市場構想が進行している。EU 結成にともない、国際的な電力融通の自由化をうながす第三者アクセス (TPA: 国をまたがる国際的な電力託送) など、今後ヨーロッパ圏内の電力取引の自由化は進展していくものと予想される。

原子力発電を将来の主力電源と位置づけるフランスと日本は、投資の面から長期戦略が不

可欠であり、短期的な行動の強調されがちな競争環境が大幅に導入されるとは考えにくい。電力価格に大きな地域差のあるアメリカやヨーロッパと比較して、価格の地域差が小さな日本にどの程度送電設備の開放化が定着するか疑問視する見方もある。

電力系統技術の世界の動向を見ると、規制緩和時代を反映した電力系統解析技術の台頭が見られる。本稿では、その背景といくつかの事例を紹介したい。

## 2. 競争環境の特徴と電力取引の実現

規制緩和の結果、競争環境のもたされた電力システムには、共通して次のような特徴が見られる。

- 1) 独立系発電会社、マーケット、消費者、発電セクタ、送電セクタ、配電セクタなど多様で多数の関係者 (entity: システムを構成する存在要素・当事者、party、stakeholder、business partner などとも呼ばれている) から構成されている。
- 2) 関係者間の複雑な電力取引を、現実の電力システムで物理的に実現する手段が必要となる。
- 3) 電力品質を維持し、将来にわたる設備計画を決めるためには、電力取引の利害に関して中立な第 3 者組織が電力システムの運用・計画を担当することになる。

規制緩和が先行しているイギリスでは、プール型 (単一電力市場型) の電力取引が採用されている。それぞれの発電会社は、送電ネットワーク会社の運用する電力市場に販売電力を応札し、やすい入札発電電力から順次系統並列が決まるというシステムである。スポット市場の電力プライス変動を抑制 (ヘッジ) するため、発電会社・配電会社間の直接長期契約も併用されている。イギリスの状況については、これまで

にも多くの紹介があるので、本稿では、現在急速に進展しているアメリカの電力取引の状況を中心に紹介したい。

アメリカの連邦間の電力取引は、バイラテラルコントラクト型がベースとなっており、一対の電力取引を単位とした多数の電力取引が同時に存在する。イギリスのように電力取引に対する共通の市場は存在しない。このように複雑な電力取引を、どのようにして物理的に電力システムの上の実現したらよいであろうか。

アメリカの設備所有者は流通設備の空き容量 (ATC) とその利用料金を公示することが、ルール No. 888 により義務づけられている。このルールの施行にともなって、設備を持たない多数のマーケットタが電力取引に参入してきている。電力取引を電力システム上で現実の電力潮流として実現するまでには、

- 1) 関係者間の電力取引の成立、
- 2) 電力取引を実現させるために送電の権利を予約し送電容量を確保する、
- 3) すべての電力取引を取りまとめて運用計画を立て、電力取引を実システムの上で実現する、

の 3 段階のプロセスをふむ必要がある。電力取引にかかわる関係者は、マーケットタ、電源 (発電会社)、負荷 (消費者)、制御所であり、電源あるいは余剰電力をもつ制御所からの「買い」と負荷あるいは電力が不足している制御所への「売り」が電力取引の始まりである。NERC の考え方では、セキュリティコーディネータ (全アメリカで 22ヶ所) が各地域の電力取引を取りまとめることになっており、その方式を送電予約システムと呼んでいる。

これによれば、マーケットタはインターネット経由でオンライン情報システム OASIS に公示されている送電線の空き容量と料金をにらみながら、OASIS を経由してセキュリティコーディネータに送電利用の予約を申し込むことになる。セキュリティコーディネータは、この送電利用の申込がネットワーク内の電力潮流分布に及ぼす影響を計算して、申し込まれた予約が電力取引のための空き容量の範囲内にあることを確認して、予約タグを発行することになる。

NERC と EPRI は、主として制御所間の連系送電網を対象とした送電予約の取り扱いと予約確認の方法について報告書をまとめており、1996 年 12 月に NERC 評議員会の承認を得ている。図 1. は NERC の送電予約システムのコンセプトであり、左側が電力取引の場、右側が実システムを示している。マーケットタが OASIS 経由で送電

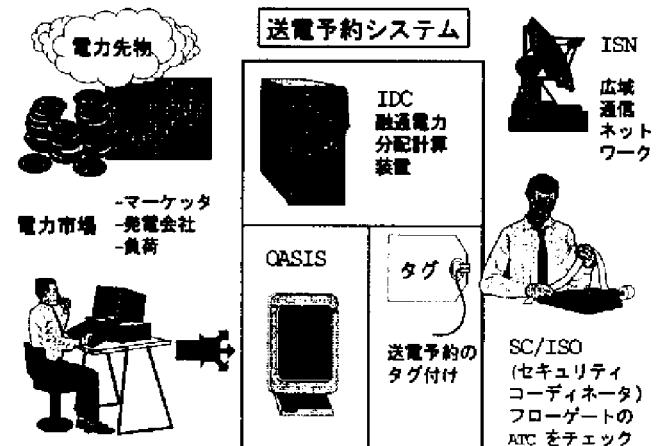


図 1. 電力取引を実現させる送電予約システム

予約を申し込むと、連系系統送電網の要所要所に設定したフローゲート (送電余裕のチェックポイント) の空き容量 ATC をチェックして、広域通信システム ISN により連系系統内の確認をとりつつ、無理がなければ予約確認のタグを OASIS 経由で発行するシステムである。ホテルの予約システムにおいて、空き部屋をチェックして予約確認書を発行するシステムとなんらかわらない。送電予約が送電ネットワークの電力潮流に及ぼす影響を計算する点が複雑なだけである。融通電力分配計算装置 IDC を支援システムとしたフローベース送電予約法を用いて、送電予約申込に対する予約確認 (タグ発行) を行うことになる。

### 3. 競争環境がもたらした技術課題

電力システムのように巨大で複雑なシステムに電力取引にかかわる多数の関係者が参入してきたとき、「だれが」「どのように」電力品質や信頼性の維持に責任をもつのか、「どのような設備を」「いつ」計画していけばよいのかなど技術課題が山積している。ルール No. 888 では、その役割を第三者による公正なシステム運用組織 ISO が果たすことになっており、ニューイングランド州では 1997 年 7 月にスタートし、カリフォルニア州では 1998 年 1 月に向けて設立の準備が進められている。

1997 年 NERC より競争環境下での信頼度維持について中間報告書が提出されており、それによれば

- 1) 電力システムの信頼度維持と競争市場オープン化の共存を目指す、
- 2) 信頼度維持の故に電力産業の市場化に不必要な制約をかけてはならない、
- 3) 信頼度維持は吟味された技術基準の元に

- 行われなければならない、
- 4) 技術基準は明確で、透明性が高く、関係者に差別をつけることなく、実行可能であり、関係者すべての承諾が必要である、
  - 5) 信頼度維持はシステム運用者によるところが大きい、公正な第三者組織であること必要、
  - 6) 信頼度維持に関わる経費は回収できなければならない、またその経費は関係者が公正に負担しなければならない、

などがポイントとしてあげられている。最終報告書は1998年1月に公表されるとのこと。

規制緩和の結果、厳しい競争環境が遠因と見られる事例が発生している。アメリカ西部 WSCC 系統で1996年7月2日と8月10日の2度にわたり、広域大停電事故が発生した。いずれの事故も、カナダの安い電力が南下して南西部の冷房需要をまかなっていたときであり、猛暑やリレーの誤動作から誘発された電圧崩壊が事故の直接の原因とされている。8月10日の事故は、軽度線路事故が次々と広い地域にわたって3回発生し、それが大事故のきっかけになっている。いわば(n-3)セキュリティが問われていることにもなる。事故の概略を図3.に示した。8月10日の事故は、750万戸を停電に巻き込んでおり、日本の1987年電圧崩壊事故と比較しても、数倍も大きな事故であった。



図2. WSCC 系統の広域大停電事故

WSCC 系統事故より得られた教訓としては、

- 1) 系統保護:保護リレーの構成点検が不十分、保護リレー間の協調が十分でない、隣接システムのレスポンスも配慮したモデル構築が必要、現在保護リレー試験方式を検討中、
- 2) 通信:制御所間の連絡が不足、特に事故継続中に十分な通信が確保できなかった経験を生かして、効率性を度外視したセキュリティ用通信回線 ISN を準備中、
- 3) 運用のための解析ツール:小事故の集まりが重大事故に発展したことを踏まえ、発生頻度は小

さいけれども厳しい運用状態に対する運転員の理解と認識を助けるツールが必要、十分な監視設備を背景に無効電力供給力の現在量が信頼度維持に十分であるか把握するための解析ツールを開発中、

- 4) 需給計画:需給担当者と運転担当者の密接な連携が必要、需給計画段階で無効電力の確保が必要、とくに発電機による緊急時の無効電力供給能力について把握しておく必要あり、
  - 5) 訓練:補修作業についての訓練不足、通信設備の利用の仕方について訓練不足、位相変圧器、新型保護リレーシステムなど高機能機器について運転員が習熟していない、連系運用の資格認定など検討中、
  - 6) 線下用地の補修:樹木の刈り込み不足、訓練も含め「よき電力会社の運用」ガイドラインを検討中
- などがあげられている。

別の事例として、1997年夏にアメリカ東部地域 (NEPOOL と MAIN 地域) では、10GW 近くの原子力発電設備が作業停止または休止したため、表1に示すようにこれらの地域の供給予備率が著しく低下して、電力不足の危機を招いた。これに対応して、表2に示す緊急対応策と次節で述べる緊急時の過負荷解消方策 LLR や輪番停電プログラムを併用して、重大な事態を回避することができたとしている。

表1. アメリカ東部地域の1997年8月の需給推定

供給地域	可能発電量 (MW)	地域内需要 (MW)	予備率 (%)
MAIN 地域			
N. Illinois	19 441	18 928	2.6
E. Missouri	8 846	7 421	16.1
SC. Illinois	9 956	8 286	16.8
WI. Michigan	12 137	9 554	21.3
NPCC 地域			
New York	35 442	27 057	23.7
NEPOOL	21 418	21 400	0.1
全アメリカ	723 686	595 323	17.7

表2. 1997年夏にNEPOOLで行った電力不足解消行動

緊急行動のレベル	緊急行動の内容	電力不足解消量 (MW)
1-2	発電機最大出力運転	125
3-5	消費者の遮断可能負荷を遮断	25
6	外部系統から緊急電力を購入	500~900
7-8	さらに遮断可能負荷を遮断	100
9-10	自家発電機、さらに負荷遮断	180
11	運転予備を一部供給にまわす	575
12-13	5%の電圧低減運転	475
	運転予備の大半を供給	1000
14-15	メディア利用によるボランティア消費節約の呼びかけ	570
合計		3875

#### 4. 電力系統解析技術の新たな展開

規制緩和が先行しているアメリカ・ヨーロッパの系統技術には、いくつかの新しい解析技術の台頭が見える。

##### 4.1. 線路の空き容量 ATC の評価

線路の物理的な輸送容量 TTC は、(熱限界容量、電圧安定性に関わる限界容量、位相安定性に関わる限界容量) の最小値から決まるが、これらの値は系統状況に応じて複雑に変化する。電力取引のための空き容量 ATC は、TTC から負荷変動や電源の故障など確率変動に対応する送電予備量 TRM と連系により設備節約した分に対応する予備量 CBM を差し引き、さらに計画潮流を差し引いて決まることになる。

$$ATC = TTC - TRM - CBM - (\text{計画潮流})$$

ATC は電力取引と送電予約の鍵となるパラメータである。その計算法については関係者すべての同意が必要であり、計算法の確定が急務とされている。

##### 4.2. 電力取引がネットワークに及ぼす影響、分配係数、融通電力計算装置 IDC

図 3. は制御所 A から F に電力取引があったとき、各制御所間の線路(フローゲート)を流れる電力フローの割合(分配係数)を示してある。もし電力取引が 1200MW であれば、線路 E-F には  $1200 \times 0.11 = 132\text{MW}$  のフローが流れることになる。各線路のフローがその線路の空き容量の範囲内であれば、この電力取引は成立する。もしも線路 E-F の空き容量が 100MW であったとすれば、ほかの線路に余裕があっても電力取引は成立しない。削減すべき取引量は  $(132 - 100) \div 0.11 = 291\text{MW}$  であり、修正した取引量は  $1200 - 291 = 909\text{MW}$  となる。

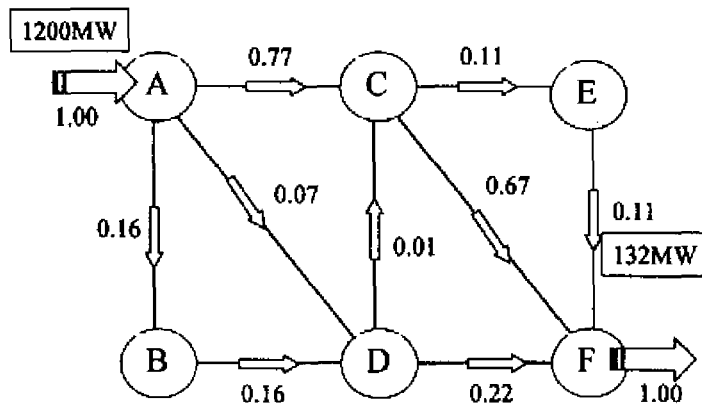


図 3. 制御所 A-F 間の電力取引と分配係数の例

この分配係数は電力取引の制御所の組み合

わせにより異なる。系統の状況に合わせて計算する装置を融通電力計算装置 IDC といい、送電予約システムの根幹となる。1997 年 7 月に 99ヶ所の制御所と 1164ヶ所のフローゲートから構成されるアメリカ東部地域を対象とした IDC のプロトタイプが試行を始めており、分配係数の要素は数百万のオーダーになるという。1998 年にはアメリカ全域をカバーする IDC が実行段階に入るとしている。計算の基本は、電力取引を制御所への単位入射フローとした直流法による潮流計算である。

##### 4.3. その他興味ある解析対象

重潮流領域回避方策、電力取引に応じた電力フローの色づけの問題、アンシラリーサービスの関係者間の分担、情報タグ・通信メディアの設計の問題、関係者による自律分散型運用と秩序生成の問題など規制緩和に付随して多くの技術課題が出てきている。

#### 5. 知能工学手法の応用可能性

##### 5.1 TARGET OF AI APPLICATIONS IN JAPAN

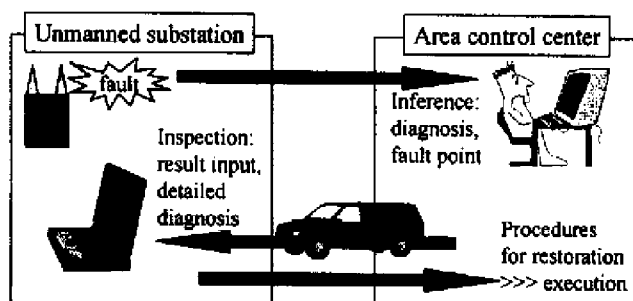
Target of AI applications in Japanese utilities are summarized in four issues. First issue would be a realization of heuristic approach by using AI tools. Well experienced engineer can obtain significant solution from mixture of quantitative, qualitative and uncertain data. If such a well-trained engineer can be replaced by AI machines, it will be useful as a support system for operation of power system. Flexibility and robustness of these machines are necessary because the operating status is not always consistent in the power system.

Main target of AI machine would be realization of a human-oriented intelligent system. It will be friendly to the operator of facilities in the vertically bundled system. In competitive circumstance, it should be more customer-oriented and more business-partner oriented. From practical viewpoint, more effective tools would be realized by embedding AI technologies into the existing technologies.

The expert system and the knowledge-based approach prove powerful tools as support systems for diagnosis, monitoring, operation, maintenance and restoration. The expert system is already established in power field. The artificial neural network and the fuzzy-based approach exhibit their ability in load forecasting, exciter control of generator and other non-linear control problem. The

simulated annealing, the generic algorithm, the chaos and other A-life type approach would be useful when they used with the existing and well established methodology.

I would like to illustrate three examples which are applied in the real power system.



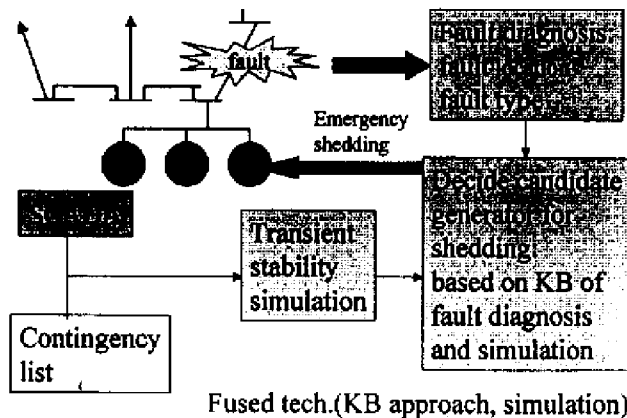
Application of knowledge-based approach

Figure 4. Maintenance support system in 275kV unmanned substation

First example is a maintenance support system in 275 kV unmanned substation of Kansai area as shown in Figure 4. When the fault occurs in the substation, the expert system type inference engine performs fault diagnosis. The engineer goes to the substation to inspect the fault status in 30 min.. Detailed diagnosis is done by using the inspection report. Finally, AI machine shows the procedures for restoration to the operator. The operator in the area control center executes the restorative procedure after checking the results from AI machine. This system is evaluated as ES machine is equivalent to one of the operators.

The second example is an application of the fused technology of ANN and the analog and digital spectrum analyzer in TEPCO. The purpose of AI machine is to detect abnormal state in the gas insulated system. Causes of abnormal states and the sensor signals are very broad and spread out. Rough extraction of signal features is done by the spectrum analyzer. ANN machine is used for more detailed detection of abnormal state.

Last example is the real time stabilization by generation shedding in Chubu EPCo. as shown in Figure 5. In normal and/or alert state, the transient stability simulation identifies a candidate generator for shedding. It depends on the contingency for simulation.



Fused tech.(KB approach, simulation)

Figure 5. Real time stabilization by generation Shedding

Once fault occurred in the network, a knowledge-based machine executes the fault diagnosis. Compared with the simulation results by using knowledge-based data, an emergency shedding action, the selection of shedding generator, is decided. Candidate generators are updated in every specified period, say each 5 minute.

Research activities related to AI technologies was very hot in the beginning of 1990's. After the amendment of utilities law, R&D activity of AI machine seems to be not strong among the investor-owned-utility. In the academic side, WG for surveying of AI technologies has been organized in IEE Japan periodically, in every 2 or 3 years, since middle of 1980's. Panel type forums of AI application was held by Cooperative Organization of Electricity Research in 1988 and in 1995, respectively. Topics of WG's and forum's are listed in the reference(5.-8.).

## 5.2 INTELLIGENCE ENGINEERING AFTER DEREGULATION

Figure 6 illustrates the trend of infrastructure in society in order to identify the requirements for AI machines under competitive circumstance. A deregulated society appears in power industry in the beginning of 1990's. Internet and intranet will promote the spread of multi-media. Growth of electricity consumption is not strong in this era. Lower growth rate introduces stronger consumer incentive to use electricity wisely by selecting the profitable tariff and DSM program. Popularization of multi-media accelerates this tendency.

1950	1970	1990
Industrialized society	Information-based society	Deregulated society
growth rate of electricity consumption		
10%	2%	4-5% 2-3%
analog	digital	multi-media
	down-sizing centralized	internet, intranet open open-distribution

Figure 6. Trend in infrastructure

Key words before deregulation society are the cost-effectiveness and the reliability enhancement within the limited investment as shown in Figure 7. The operator friendly AI machine is an object of development. After deregulation society, a variety of entities, such as IPP, marketers, customers and others, joined in the power system. The performance of entities is evaluated by the profit-maximization. Customer-oriented or business-partner-oriented approach will be adopted. Ancillary service of network will be charged by separated way, such as the pricing of frequency control, the pricing of voltage control, the pricing of spinning reserve and so on.

Before deregulation	After deregulation
cost-effectiveness	profit-maximization
reliability enhancement	maintain ancillary service
Operator friendly approach	Customer oriented approach

Figure 7. Power industry into competition

Rationality, transparency and confidentiality are important key words in the competition-based approach. For fair competition and non-discriminatory transaction, the adopted methodology should not include uncertainty or any ambiguity. Transparency and confidentiality are contradictory concept each other.

One of significant property of competitive circumstance is a variety of entities in the market. Behavior of entities are based on profit-maximization. Non profit third party has responsibility to coordinate

entities behavior and to maintain the power quality. AI application would be strongly related to the behavior of entity.

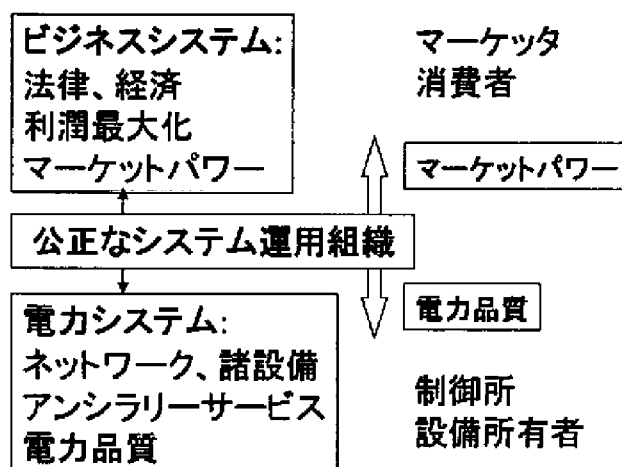


Figure 8. Engineering-business mixed system

As illustrated in Figure 8, security coordinator acts like a barrier or a wall between the business system and the engineering system. It will moves by balance of the market power and the power quality. If the market power becomes strong, total system will move into the insecure condition. AI applications will be useful in both side.

New type AI application will appear after deregulation. One is a support system to find out profit-maximization strategy for each entity. Another is a support system to make coordination among entities and to maintain the power quality in a specified level. There are other possibilities for clever use of AI technologies in competition-based system.

### 5. むすびにかえて

1990年代にはいって、電気事業の規制緩和の波は先進諸国のみならず、新工業化国も巻き込んで急ピッチに進展している。1998年4月のカリフォルニア州のISO開設にタイミングを合わせて、APXというグリーンパワー利用者を対象としたマーケットが設立されている。ソーラー、風力など発電設備の所有者とそのようなエネルギーを利用したい消費者を結び付ける会社である。規制緩和は、消費者に発生電力の素性も選択しうる場をもたらしているといえる。地球温暖化対策に協力するため原子力で発生した電力を利用したいという消費者にも対応できるはずである。