

和文題目:

電力ネットワークのハイブリッドダイナミクス:
モデル, 解析, 制御

著者:

薄 良彦, 引原 隆士*

English Title:

Hybrid Dynamics of Power Networks: Models, Analysis,
and Control

Author:

Yoshihiko SUSUKI, Takashi HIKIHARA

電力ネットワークのハイブリッドダイナミクス: モデル, 解析, 制御

薄 良彦, 引原 隆士*

1. はじめに

近年, 電力ネットワークを支える技術的基盤, 経済的環境の変化が著しい [1]. 技術的には, 環境負荷低減を目的として, 太陽光発電・風力発電などの分散形電源の開発が進められている [2]. 経済的には, 電力自由化として周知の電気事業制度の再構築が進んでいる. これらの変化の下では, 電力ネットワークに生起する物理現象¹が従来とは異なった様相を呈することが予想される. 上記の変化が, 2003 年北米・欧州における波及的停電の発生に関係しているとの指摘もある [3,4]. これを受けて, 電力ネットワークの変化に対応可能な解析・運用手法の検討が始まっている [5].

解析・運用手法の検討では, 生起する物理現象—ダイナミクス—に立脚することが重要である. 電力ネットワークは, 発電所・負荷・送電線などを含む大規模システムである. 発電を担う同期機(回転機械)が送電線(電気回路)を介して結合しているため, 電力ネットワークは電気機械結合という観点でハイブリッド性を有している. 本解説は上記構成の観点と異なり, 生起するダイナミクスと適用される制御手法のハイブリッド性に着目する. なお, 本内容に関連する解説として文献 [6-9] がある.

本解説の目的は, 電力ネットワークのハイブリッドダイナミクスに関するモデル, 解析・制御手法を紹介することである. また一例として, ハイブリッドオートマトンの可到達集合を用いた解析手法を説明する. 2. では, 過渡安定問題, 電圧安定問題, マーケットダイナミクスとの複合問題を紹介し, 電力ネットワークのダイナミクスと制御のハイブリッド性について述べる. 3. では, ハイブリッド性を考慮したモデル, 解析・制御手法に関連する研究結果を整理する. 4. では, ハイブリッドオートマトンの可到達集合を用いた解析手法を説明し, 5. で本解説をまとめる. なお, 本解説の内容は電力ネットワークの解析・制御へのハイブリッドシス

テムの理論の適用である. 適用される理論については他の解説 ([10,11] など) を参照されたい.

2. ハイブリッドダイナミクス

本節では, 電力ネットワークのダイナミクスと制御手法を時定数と性質の観点から整理し, ハイブリッドシステムとしての研究を必要とするダイナミクス・制御の問題を紹介する. 本節では, 過渡安定問題・電圧安定問題ならびにマーケットダイナミクスとの複合問題について述べる.

2.1 過渡安定問題

過渡安定問題²とは, 三相地絡などの大きな故障が発生した場合に, 発電機が運転継続可能か否かを検討するものである [12]. 過渡安定問題に関するダイナミクスは発電機の機械的動揺が主であり, 発電機の電気機械的特性とネットワーク内の電力バランス(主に有効電力³)により決定される. 動揺の時定数は秒オーダーであるため, 解析する場合に, これより速い電気回路の過渡現象や遅い調速器の応答などは考慮されない.

過渡安定問題に関する制御目的は, 故障発生後も発電機が運転継続可能であることを保証することである. 制御手法としては, 電圧調整装置 (AVR) による発電機界磁⁴の調整や, 保護リレーによる発電機の分離⁵や送電線経路の切替(以下, 送電線切替とよぶ), 直流送電による有効電力バランスの調整が挙げられる. ここで, ダイナミクス・制御のハイブリッド性には, 保護リレーおよび直流送電の適用が該当する. 以下では, 発電機の機械的動揺と保護リレーによる分離操作の相互作用について考える.

故障発生により一台の発電機に機械的動揺が発生したとする. 運転継続が困難な場合の一つとして, 発電機の脱調状態(同期はずれ状態)がある. 脱調検出機能を

²電力工学で「過渡安定性」「過渡安定度」として周知の概念である. システム・制御分野における安定性の概念と区別するため, 本解説では上記用語を用いない.

³交流回路の定常状態で瞬時電力の時間平均に一致し, 抵抗で消費される正味の電力を意味する. 対称三相回路の定常状態では瞬時電力に一致する.

⁴同期機内部で回転する磁石のこと. 多くの場合, 電磁石であり, 磁界の強さを変更できる.

⁵発電機をネットワークから切り離すこと.

* 京都大学大学院 工学研究科 電気工学専攻

Key Words: power system, hybrid system, transient stability, voltage stability, market dynamics, safety verification

¹本解説の議論は商用周波数 (50 Hz または 60 Hz) より十分遅い現象に限定する.

もつ保護リレーは、動揺した発電機が脱調状態に至る過程をオンラインで測定し、あらかじめ設定した条件に従って発電機をネットワークから分離する。この結果、分離された発電機の出力電力を運転継続中の発電機が供給することになり、ネットワーク内の有効電力バランスが変化する。この変化は残りの発電機に機械的動揺を発生させ、苛酷な場合には、再び保護リレーによる発電機の分離操作を生むことになる。この時、発電機の機械的動揺を連続値変数による力学でモデル化すると、保護リレー操作は離散値変数による事象としてモデル化できる。このような発電機の機械的動揺と保護リレー操作の繰返しは、2003年イタリアの波及的停電[3,4]で観察されている。

さらに、発電機の機械的動揺が空間的に伝播していく現象が報告されている[13]。Thorpら[14]は、このような動揺伝播現象を非線形偏微分方程式でモデル化し、米国で実測された動揺伝播を定量的に評価している。このような動揺伝播の制御を考える場合もハイブリッド性の考慮が必要である。送電線切替の時定数は動揺の伝播速度と比較して短く、離散値変数による事象としてモデル化できる。このように、過渡安定問題ではダイナミクスと制御のハイブリッド性が重要である。

2.2 電圧安定問題

発電機の端子電圧や母線¹電圧、負荷電圧は、故障発生や負荷変動により数秒から数時間の時定数で変動する。特に、負荷変化などにより制御に関わらず電圧が著しく低下する現象は電圧崩壊と呼ばれる。電圧安定問題²とは、故障発生・負荷変動が発生した場合に電圧が設定値に回復するか否かや、負荷変動時に電圧が許容範囲内にとどまるか否かを検討するものである[12]。送電線抵抗が小さい場合、電圧安定問題に関するダイナミクスは、発電機・負荷の電気的特性とネットワーク内の無効電力³バランスにより決定される。

電圧安定問題に関する制御目的は、電圧崩壊などの異常現象を回避し電圧を許容範囲内にとどめることである。制御手法としては、AVRによる発電機界磁の調整、変圧器のタップ切換⁴や並列コンデンサの接続・開放⁵などが挙げられる。ここで、ダイナミクスと制御のハイブリッド性としては後者が該当する。例えば、変圧器のタップ切換では、負荷電圧とあらかじめ設定した条件によりタップ位置を変更し、負荷電圧を許容値近くに維持する。ここで、電圧安定問題に関わるダイナ

ミクスは数分から数時間の時定数を有している。よって、電圧変動を連続値変数による力学でモデル化すると、上記の変圧器・並列コンデンサの操作は離散値変数による事象としてモデル化できる。

電圧安定問題は、波及的停電の発生においても重要である。母線電圧の低下により、保護リレーが動作し送電線切替が発生する。切替に伴いネットワーク内の無効電力バランスが変化し、他の母線電圧の低下が発生する。これは他の保護リレーの動作を引き起こすので、送電線切替が繰返し発生することになる。同時に、変圧器のタップ切換や並列コンデンサの投入が電圧低下の回避にむけて断続的に続いている。上述の相互作用は、2003年北欧で発生した波及大停電の一要因と指摘されている[3,4]。このように、波及的停電の検討では、送電線切替や制御器の断続動作と電圧変動の相互作用が重要である。

2.3 物理・マーケットダイナミクスの複合問題

最後に、物理ダイナミクスとマーケットダイナミクスとの相互作用を考える。近年の電力自由化に伴い、日本では独立電源を有する電気事業者の電力会社(一般電気事業者)への卸供給⁶や消費者への販売⁷が部分的に可能になり、2005年には電源調達を目的とした電力卸市場が開設されている。

上記の経済的環境の変化は、電力ネットワークの解析・制御手法に新しい問題を提起している。従来、周波数・電圧は電力会社により適切に維持され、長期的な需要予測に基づいて電力ネットワークは運用されてきた。特に、電気料金は一律・固定であり、料金の変動がネットワークの運用に動的な影響を与えることは少なかった。しかしながら、上記独立電源を有する電気事業者の参入や電力卸市場の開設は、電力ネットワークのダイナミクスへ影響を与える可能性がある。このような場合に、周波数・電圧などの物理ダイナミクスを解析するだけでは不十分であり、電力卸市場などのマーケットのダイナミクスとの相互作用の解析が重要になる。また、制御手法についてもマーケットのダイナミクスを考慮可能な手法の検討が必要がある。残念ながら、このような動的な複合問題が十分に研究されているとは言い難い。

ハイブリッドシステムは、物理・マーケットダイナミクスの相互作用の解析と制御について新たな枠組みを構築する可能性がある。上記の解析と制御に関する問題では階層性—マーケットダイナミクスや意志決定を対象とするレイヤー(層)と物理ダイナミクスを対象とするレイヤー—が重要である。このような問題において、連続値・離散値変数の混在したハイブリッドシ

¹送電線と変電設備を接続し、要の役目をする部分。

²「電圧安定性」「電圧安定度」として周知である。

³定常交流回路で負荷と電源とを往復するだけで抵抗で消費されない電力を意味する。

⁴変圧器の巻線比を変更することに相当し、変圧器の誘起電圧を調整できる。

⁵コンデンサは(遅れ)無効電力の供給源と見なせるため、無効電力バランスの調整が可能である。

⁶卸電力事業者 IPP (Independent Power Producer)。

⁷特定規模電気事業者 PPS (Power Producer & Supplier)。

システムの適用は有効である。プラント・制御器の階層性とそれらの相互作用はハイブリッドシステムにより検討され、交通システム [15] などの具体例がある。

3. モデル、解析、制御

本節では、電力ネットワークのモデル、解析・制御手法へのハイブリッドシステムの適用について研究結果を整理する。紙面の制約上、結果の抄録にとどめ、詳細は文献を参考にされたい。

3.1 モデル・解析

電力ネットワークのハイブリッドモデルと解析について、3種類のモデルと解析手法を紹介する。

第1は、微分代数離散システムに基づくモデルと解析である。発電機・負荷の特性は物理法則に基づく微分代数方程式で記述される一方、タップ切替付変圧器や並列コンデンサ、保護リレーの特性は連続ダイナミクスに依存した論理ルールで決定される。Hiskens ら [16,17] は、上記を微分代数離散システムでモデル化することを提案している。また、彼らはモデル化に階層化・オブジェクト指向アプローチを用いることを提案し、これが物理・マーケットダイナミクスの相互作用の検討に有用であると指摘している。解析手法としては、パラメータ変動・初期条件のハイブリッドダイナミクスへの影響を検討するために、Trajectory Sensitivity による微分代数離散システムの解析が提案されている [17]。

Fourlas ら [18] は、ハイブリッド I/O オートマトン [19] を用いたモデルを提案し、電圧低下回避への負荷遮断操作の有効性を検討している。また、ハイブリッドオートマトン [20,10] を用いたモデルも報告されている [21]。特に、ハイブリッドオートマトンの可到達集合に着目し、動作点が可到達集合に属するか否かにより過渡安定問題が検討可能であることを指摘している。

第2は、波及的停電の検討に向けたハイブリッドモデルである。DeMarco [22] は、停電などの波及的故障 (cascading failure) の解析へのハイブリッドシステムの適用を検討している。提案モデルはハミルトン系に基づいているため、故障に伴うエネルギーフローの変化が検討できる。また、波及的停電で重要な過渡安定問題の検討に向けて、ハイブリッドオートマトンに基づくモデルも提案されている [23,24]。

第3に、電圧安定問題の検討に向けたハイブリッドモデル [25-30] である。Geyer ら [25,28] は、Mixed Logical Dynamical (MLD) システム [31] の適用を提案している。本システムは、電圧変動を記述する連続時間線形モデル、変圧器のタップ切替、並列コンデンサの投入や負荷遮断の操作を記述する離散事象システムを統合し、時間に関して離散化することで得られる。電圧安定問題では、比較的長い時定数のダイナミクスと AVR などの線形制御系の応答が支配的であるため、多くの場合、

電圧変動は連続時間線形モデルで近似できる。他のモデルとしては、上述の微分代数離散システム [26] や統合モデル [27]、非線形性を考慮したハイブリッドモデル [29,30] がある。MLD システムについては、船上電力ネットワークの解析への適用も報告されている [32]。

3.2 制御

電力ネットワークの制御へのハイブリッドシステムの適用も複数の研究結果がある。本節では、過渡・電圧安定問題に関する制御手法を紹介する。

過渡安定問題に関わる制御については研究結果があまり多くない。Hill ら [33] は、過渡・電圧安定問題に関する制御器を併せて設計するために、過渡・電圧に関する安定化制御器を個別に設計し、メンバーシップ関数を用いてそれらを切り替える手法を提案している。また、可到達集合に基づく過渡安定問題の検討 [21] が、発電機の脱調回避に向けた送電線切替則の決定に有効との指摘がある [23]。

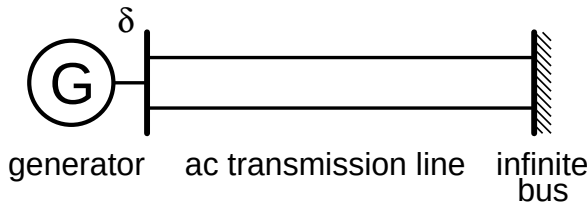
電圧安定問題に関わる制御には多数の研究結果が報告されている。Geyer ら [25] は、MLD システムを用いたモデル予測制御の適用を提案し、数値計算を通して有効性を検証している。彼らは、制御対象を4母線系統、制御器をタップ切替付変圧器、制御目的を母線電圧を許容範囲内にとどめ、かつタップ切替の回数を最小化することとし、ハイブリッド性を陽に考慮した制御手法を提案している。また、負荷遮断回数の最小化や電圧崩壊の回避という実用上必要な制御目的を加えた場合にも、モデル予測制御の適用が有効であることが示されている [28]。モデル予測制御の適用は上記以外にも文献 [27,29] で報告されている。

4. ハイブリッドシステムによる過渡安定問題の検討

本節では、ハイブリッドオートマトンの可到達集合を用いた解析手法 [21,23] を説明する。本手法は、2.1 節で述べた発電機の機械的動揺と送電線切替の相互作用をどのように評価し、発電機の脱調回避に向けて送電線切替則をどのように設計するのかという具体的な問題に立脚している。ハイブリッドシステムの可到達集合は、工学システムの安全性検証に関連して理論的結果が複数報告されており、ハミルトン・ヤコビ方程式やレベルセット法を用いた可到達集合の導出アルゴリズム [34,35] などが知られている。本節では、第1図の一種無限大母線系統を対象として提案手法を説明する。

4.1 ハイブリッドオートマトンを用いたモデル化

ハイブリッドオートマトンを用いることで、発電機の機械的動揺と送電線切替の相互作用をモデル化できる。ハイブリッドオートマトンは、連続値変数と離散値変数のダイナミクスと相互作用を記述するハイブリッ



第1図 一機無限大母線系統. 1台の同期発電機が, 交流送電2回線を介して無限大母線(電圧・周波数不変の母線)に連系されている. 保護リレーは母線の直前に設置されている.

ドシステムの1モデルとして知られている[20,10]. 連続値変数のダイナミクスは, 連続ベクトル場, あるいはフローとして記述され, 発電機の機械的動揺をモデル化可能である. 一方, 離散値変数の遷移は, 故障や送電線切替に伴うネットワーク構造の変化を記述する. また, 離散値を取る制御変数により, 送電線切替を行なう保護リレーの論理シーケンスを離散制御則としてモデル化できる.

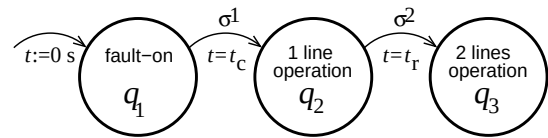
4.2 可到達集合を用いた過渡安定問題の検討

ハイブリッドオートマトンの可到達集合により, 発電機の運転継続可能性を検討できる. まず, ハイブリッドオートマトンの部分状態集合である危険集合 G [34] を定義する. 危険集合 G は, 発電機の運転継続困難な状態を表す. 例えば, 発電機の回転数が定格値 (1500 rpm または 1800 rpm) から大きく離脱した場合などが相当する. このとき, ハイブリッドオートマトンの時刻 t (< 0) に対する後退可到達集合 $R_t(G)$ を, 連続・離散制御変数の値に関わらず時刻 $|t|$ までに危険集合 G の境界 ∂G に到達する解の集合と定義する [34]. ここで, 故障発生時の発電機の運転状態が可到達集合 $R_t(G)$ 内に存在するならば, 発電機は時刻 $|t|$ までに危険集合 G が表す (危険) 動作に至ることになる. 逆に, 故障発生時の運転状態が $R_t(G)$ 外に存在するならば, 発電機は時刻 $|t|$ までに危険動作を示さない, すなわち時刻 $|t|$ まで発電機は運転継続可能であると判断できる. このように, ハイブリッドオートマトンの可到達集合を用いて過渡安定問題を検討することができる.

4.3 数値計算結果

第1図の一機無限大母線系統に対する数値計算結果を示す. 時刻 0 s に交流送電1回線で故障が発生し, 時刻 t_c (> 0 s) まで故障が継続した後, 時刻 t_c に保護リレー動作により故障回線が除去されたとする. また, 時刻 t_r ($> t_c$) で故障回線が再び閉路 (再閉路) されたとする. 本検討の目的は, 再閉路後に発電機が継続運転可能か否かを故障発生時に判定することである.

第2図は, 発電機の機械的動揺と送電線切替の相互作用を表すハイブリッドオートマトンである. 離散値変数 q_i ($i=1,2,3$) は, ネットワークの構成—故障中・1回線運転・2回線運転—を表す. 離散遷移 σ^i ($i=1,2$)



第2図 発電機の機械的動揺と送電線切替の相互作用を表すハイブリッドオートマトン. 離散値変数は, 故障継続中・1回線運転・2回線運転を表し, 離散遷移は, 故障除去・再閉路操作を表す.

は, それぞれ故障除去操作, 再閉路操作を表している. また, 発電機のダイナミクスは, 以下の動揺方程式で記述される. δ は発電機回転子の無限大母線を基準にした位置, ω は定格回転角周波数からの偏差である.

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega, \quad \frac{d\omega}{dt} = p_m - \alpha b \sin \delta - d\omega. \quad (1)$$

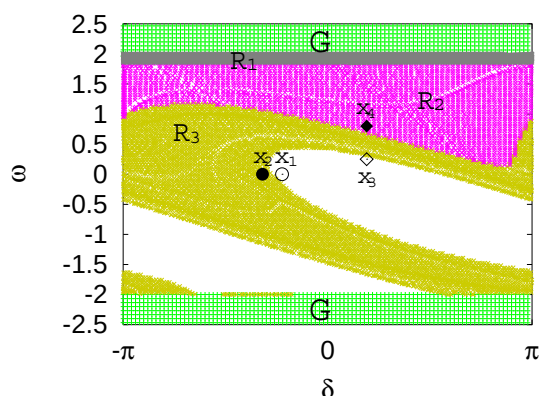
なお, p_m , b , d は固定パラメータである. α は離散変数毎に異なる値を取り, q_1 で $\alpha=0$, q_2 で $\alpha=0.5$, q_3 で $\alpha=1$ である. 危険集合 G は, 連続値変数の部分集合 $\{(\delta, \omega) \mid |\omega| \geq 2.0\}$ とする. 物理的には, 発電機の運転上許容されない回転角周波数偏差の範囲を表している.

第3図に, $t_c=0.1$ s, $t_r=0.6$ s, $b=0.7$, $p_m=0.2$, $d=0.05$ におけるハイブリッドオートマトンの可到達集合を示す. 可到達集合の算出は危険集合の境界 ∂G からの時間逆向きの数値積分に基づいている. 時間 t を十分大きくとることにより, 図の可到達集合 $R_t(G)$ は $t \rightarrow +\infty$ の結果と見なされる. 第3図は, 故障発生時 (時刻 0 s) における連続値変数の初期条件と危険集合 G を表している. 可到達集合は, 3つの部分集合 R_1 , R_2 , R_3 の直和として表現される. 部分集合 R_i 内部に初期条件を定めた場合, 解軌道は離散変数 q_i で危険集合 G の境界 ∂G に到達する. 例えば, 故障発生時の運転状態が R_1 内部にあるならば, 発電機は故障継続中に危険動作に至ることを意味する. よって, 第3図の x_1 に運転状態がある場合に, 発電機は再閉路後も危険動作を示すことはない. 一方, x_2 に運転状態があった場合は, 発電機が再閉路時刻 t_r までに危険動作に至ることがわかる. このように, ハイブリッドオートマトンの可到達集合により発電機の運転継続可能性を検討できる. 他にも可到達集合に基づく検討手法は, 電圧安定問題 [30] や事故復旧手法の評価 [36] に適用されている.

5. おわりに

本解説では, 電力ネットワークのハイブリッドダイナミクスについてモデル, 解析・制御手法の観点から関連する研究結果を紹介した. また, ハイブリッドオートマトンの可到達集合を用いた解析手法を説明した.

最後に, 今後の展望を整理する. 第1に, 計算量の問題とモデル化の方法論である. 実際の電力ネットワークは, 前節の一機無限大母線系統と異なり, 多数の発電



第3図 ハイブリッドオートマトンの可到達集合 ([23] から転載). 故障発生時 (時刻 0 s) における運転状態の集合 (初期状態の集合) である. G が危険集合, $R_i (i=1,2,3)$ が可到達集合である. 添字 i は, 発電機が危険動作に至るタイミングを表している. 例えば, R_1 は離散値変数 q_1 で解軌道が危険集合 G に到達する, 即ち, 発電機が故障継続中に危険動作に至ることを表している.

機・負荷を含み複雑なネットワーク構造を呈している. このような複雑なネットワークに対して, 前節で述べた可到達集合の計算量は膨大になり現実的ではない. 本問題に対処するためには, 安定問題の物理を明確にしたハイブリッドモデルの再構築が必要である. ボトムアップで積み上げていく現状のモデル化では, 計算量の問題を解決することは困難である.

第2に, ハイブリッドシステムに基づく解析・制御手法の実用化である. 実ネットワーク運用では蓄積された経験が重要な側面を担っており, ハイブリッドシステム理論の1例題としての研究が電力工学にインパクトを与えることは難しい. ハイブリッドシステムの観点を実ネットワークで役立てるためには, 実用レベルで重要な問題に明解な解答を与えることが必要である. 例えば, 前節の可到達集合に基づく解析手法は事故復旧支援システムの開発に寄与する可能性がある [36]. 今後は, ハイブリッドダイナミクスの取扱いを要する問題を地道に解決していくことが必要である.

第3に, 実ネットワーク運用の不確定性とハイブリッドシステムの方法論の接点である. 広域大停電の発生や電力自由化の影響を検討する場合, ネットワーク化された大規模実システムで不確定性がどのように伝播するかを評価することが必要になる. 不確定性の伝播と非線形ダイナミクスの研究は DARPA プロジェクト [37] において現在進展中であり, ハイブリッドシステムの方法論との融合は興味深い課題である.

謝辞

本解説に関してご議論頂いた海老名紘明氏, 植村卓司氏, 越智孝志氏, 横田耕作氏, 崎山卓也氏, 高辻悠氏, 矢壺修氏, 本田敦夫氏に御礼申し上げます. また, 本解

説をご検討頂いた舟木剛先生に御礼申し上げます. 本解説で紹介した研究の一部は, 21 世紀 COE プログラム (課題番号 14213201) 及び科学研究費補助金・若手研究 (B) (課題番号 18760216) による補助のもとで行なわれたことを記し, ここに謝意を表します.

参考文献

- [1] C. W. Gellings and K. E. Yeager: Transforming the electric infrastructure; *Physics Today*, Vol. 57, No. 12, pp. 45–51 (2004)
- [2] 谷口治人: 分散型電源と電力システムの制御; 電気学会論文誌 B, Vol. 121, No. 9, pp. 1065–1068 (2001)
- [3] 特集 北米大停電をめぐる諸問題 –なぜ大停電は発生したのか–; 技術総合誌 オーム, Vol. 91, No. 4, pp. 21–41 (2004)
- [4] G. Andersson, P. Donalek, R. Farmer, N. Hatziairgyriou, I. Kamwa, *et. al*: Causes of the 2003 major grid blackouts in North America and Europe, and recommended means to improve system dynamic performance; *IEEE T. Power Syst.*, Vol. 20, No. 4, pp. 1922–1928 (2005)
- [5] P. Fairley: The unruly power grid; *IEEE Spectrum*, Vol. 41, No. 8, pp. 22–27 (2004)
- [6] W. H. Esselman, D. J. Sobajic, and J. Maulbetsch: Hybrid discrete and continuous control for power systems; *Discrete Event Dyn. S.*, Vol. 9, No. 4, pp. 297–318 (1999)
- [7] L. H. Fink: Discrete events in power systems; *Discrete Event Dyn. S.*, Vol. 9, No. 4, pp. 319–330 (1999)
- [8] 引原隆士: スイッチング回路の非線形ダイナミクスとその解析; 計測と制御, Vol. 44, No. 7, pp. 440–445 (2005)
- [9] 薄良彦: 電力系統とハイブリッドシステム: 何がハイブリッド?; システム/制御/情報, Vol. 51, No. 5, pp. 240–241 (2007)
- [10] 潮俊光: ハイブリッドシステムのモデル; システム/制御/情報, Vol. 41, No. 1, pp. 35–40 (1997)
- [11] 井村順一, 東俊一: ハイブリッドシステムの制御—I: 総論; システム/制御/情報, Vol. 51, No. 5, pp. 230–237 (2007)
- [12] H. -D. Chiang, Power system stability, *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering* (ed. John G. Webster), (John Wiley & Sons, New York, 1999), pp. 105–137
- [13] R. J. Murphy: Disturbance recorders trigger detection and protection; *IEEE Comput. Appl. Pow.*, Vol. 9, No. 1, pp. 24–28 (1986)
- [14] J. S. Thorp, C. E. Seyler, and A. G. Phadke: Electromechanical wave propagation in large electric power systems; *IEEE T. Circuits-I*, Vol. 45, No. 6, pp. 614–622 (1998)
- [15] P. Varaiya: Smart cars on smart roads: Problems of control; *IEEE T. Automati. Contr.*, Vol. 38, No. 2, pp. 195–207 (1993)

- [16] I. A. Hiskens and M. A. Pai: Hybrid systems view of power system modeling; *Proc. IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Vol. II, pp. 228–231 (2000)
- [17] I. A. Hiskens and M. A. Pai: Trajectory sensitivity analysis of hybrid systems; *IEEE T. Circuits-I*, Vol. 47, No. 2, pp. 204–220 (2000)
- [18] G. K. Furlas, K. J. Kyriakopoulos, and C. D. Vournas: Hybrid systems modeling for power systems; *IEEE Circuit Syst. Mag.*, Vol. 4, No. 3, pp. 16–23 (2004)
- [19] N. Lynch, R. Segala, F. Vaandrager, and H. B. Weinberg: Hybrid I/O automata; *Hybrid Systems III* (eds. R. Alur, T. A. Henzinger, and E. D. Sontag), Lecture Notes in Computer Science 1066, pp. 496–510 (1996)
- [20] T. A. Henzinger: The theory of hybrid automata; *Proc. IEEE Symposium on Logic in Computer Science*, pp. 278–292 (1996)
- [21] 引原隆士: 電力系統解析へのハイブリッドシステム理論の適用 (I); 平成 17 年電気学会全大, Vol. 6, p. 187 (2005)
- [22] C. L. DeMarco: A phase transition model for cascading network failure; *IEEE Contr. Syst. Mag.*, Vol. 21, No. 6, pp. 40–51 (2001)
- [23] Y. Susuki, H. Ebina, and T. Hikiyara: Predicting transient instability of power systems based on hybrid system reachability analysis; *IFAC Symposium on Power Plants and Power Systems Control*, (2006), paper #588
- [24] 薄良彦, 高辻悠, 引原隆士: 電力ネットワークの構成変化を伴う過渡ダイナミクスのハイブリッドモデル: 5 地域システムの数値的検討; システム制御情報学会研究発表講演会 講演論文集, pp. 331–332 (2007)
- [25] T. Geyer, M. Larsson, and M. Morari: Hybrid emergency voltage control in power systems; *Proc. European Control Conference*, (2003)
- [26] Q. -Y. Tong, G. -F. Yan, and G. -Z. Zhao: Hybrid system view of voltage instability problem; *Proc. IEEE International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, pp. 915–918 (2003)
- [27] S. Leirens, J. Buisson, P. Bastard, and J. -L. Coulon: A hybrid approach for voltage stability of power systems; *Proc. Power Systems Computation Conference*, (2005), paper #16-1
- [28] A. G. Beccuti, T. Geyer, and M. Morari: A hybrid system approach to power systems voltage control; *Proc. IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*, pp. 6774–6779 (2005)
- [29] S. A. Attia, M. Alamir, and C. Canudas de Wit: Voltage collapse avoidance in power systems: A receding horizon approach; *Intell. Autom. Soft. Co.*, Vol. 12, No. X, pp. 1–14 (2006)
- [30] Y. Susuki and T. Hikiyara: Predicting voltage instability of power system via hybrid system reachability analysis; *Proc. 2007 American Control Conference*, (2007), (accepted)
- [31] A. Bemporad and M. Morari: Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints; *Automatica*, Vol. 35, No. 3, pp. 407–427 (1999)
- [32] H. G. Kwatny, E. Mensah, D. Niebur, and C. Teolis: Optimal shipboard power system management via mixed integer dynamic programming; *Proc. IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, pp. 55–62 (2005)
- [33] D. J. Hill, Y. Guo, M. Larsson, and Y. Wang: Global hybrid control of power systems; *Proc. Bulk Power System Dynamics and Control-V*, (2004)
- [34] C. J. Tomlin, I. Mitchell, A. M. Bayen, and M. Oishi: Computational techniques for the verification of hybrid systems; *P. IEEE*, Vol. 91, No. 7, pp. 986–1001 (2003)
- [35] I. M. Mitchell, A. M. Bayen, and C. J. Tomlin: A time-dependent Hamilton-Jacobi formulation of reachable sets for continuous dynamic games; *IEEE T. Automati. Contr.*, Vol. 50, No. 7, pp. 947–957 (2005)
- [36] 崎山卓也, 植村卓司, 越智孝志, 薄良彦, 引原隆士: 可到達集合に基づく過渡安定性評価手法に関する検討-1 回線事故時における事故復旧方法の評価-; 電気学会 電力・エネルギー部門大会講演論文集, pp. (29-25)–(29-26) (2006)
- [37] Minisymposiums on "Uncertainty Propagation in Large-scale Networked Dynamical Systems" and on "Stability in Spatio-Temporal Dynamics of Coupled Oscillators Arrays", *SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems*, Snowbird, May (2007)

著者略歴

すすき よし ひこ
薄 良 彦 (正会員)



IEEE の会員.

1977 年 12 月生. 2005 年京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了. 同年 4 月同大学院工学研究科助手, 2007 年助教となり現在に至る. 京都大学博士 (工学). 非線形動力学, 電力工学, 制御応用に関する研究に従事. 電気学会, 電子情報通信学会,

ひき はら 隆 士 (正会員)
引 原 隆 士 (正会員)



1958 年 8 月生. 1987 年京都大学大学院工学研究科博士後期課程研究指導認定退学. 同年 4 月関西大学工学部助手. 同専任講師, 助教授を経て, 1997 年京都大学大学院工学研究科助教授, 2001 年教授となり現在に至る. 京都大学工学博士. 非線形動力学とその工学的応用に関する研究に従事. 電気学会, 電子情報通信学会, 計測自動制御学会, APS, IEEE, IEE, SIAM の各会員.