

平成21年6月3日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18560293
 研究課題名（和文） 過渡安定度喪失に起因する電力系統ハイリスク事象の効率的探索
 研究課題名（英文） THE EFFICIENT SEARCH FOR HIGH RISK EVENTS OF POWER SYSTEMS
 CAUSED BY LOSS OF TRANSIENT STABILITY
 研究代表者
 三木 哲志（MIKI TETSUSHI）
 阿南工業高等専門学校・電気電子工学科・教授
 研究者番号：70290806

研究成果の概要：本研究では、電力系統のリスクの定義として、「供給支障量と発生頻度の積」を採用している。本指標に基づいて、フォールト及び自然災害発生時における過渡安定度喪失に起因する電力系統ハイリスク事象を電力系統シミュレータを用いて確実かつ効率的に探索できる実用的手法を開発し、これをモデル電力系統に適用し、その有効性を検証した。さらに、ハイリスク事象探索に及ぼす設計要素の影響評価手法を開発し、これを用いて設計要素がハイリスク事象探索に及ぼす影響を明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,200,000	0	2,200,000
2007年度	700,000	210,000	910,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	420,000	4,020,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電気機器工学

キーワード：電力工学、電力系統、過渡安定度、リスク

1. 研究開始当初の背景

電力系統は現代社会における最も重要なインフラストラクチャの一つであり、大規模な停電が発生すれば社会に甚大な影響を与える。近年、電力系統は大規模・複雑化してきているとともに、自由化が進んできており、2003年における米国・カナダの例にみられるように大停電が発生する確率が増大してきている。このような状況下において、電力系統におけるハイリスク事象を確実かつ効率的に探索する手法を開発することが強く要請されている。

2. 研究の目的

本研究では、リスクの定義として、電力系統の使命が電力の安定供給にあることを考慮し、それが損なわれる定量的指標である「供給支障量と発生頻度の積」を採用している。本研究の目的は次の通りである。

(1) 本指標に基づいて、フォールト及び自然災害発生時における過渡安定度喪失に起因する電力系統ハイリスク事象を電力系統シミュレータ(HIPERSIM)を用いて確実か

つ効率的に探索できる実用的手法を開発し、これをモデル電力系統に適用し、その有効性を検証すること。

(2) ハイリスク事象探索に及ぼす設計要素の影響評価手法を開発し、これを用いて設計要素がハイリスク事象探索に及ぼす影響を明らかにすること。

3. 研究の方法

次のステップに従い研究を遂行する。

(1) 研究目的を達成するためには、フォールト発生後の電力系統の挙動を高精度で、高速に模擬し、評価することが不可欠である。このため、制御保護装置を詳細にモデル化できるとともに、多様な非対称フォールトを精度良く模擬可能な電力系統シミュレータ(HIPERSIM)を購入し、使用方法を修得する。以下、これを用いて研究を遂行する。

(2) 当該シミュレータを用いて必要データを収集し、フォールト及び自然災害発生時における過渡安定度喪失に起因する電力系統ハイリスク事象を確実にかつ効率的に探索可能な手法を開発し、これをモデル電力系統に適用し、その有効性を検証する。

(3) ハイリスク事象探索に及ぼす設計要素の影響評価手法を開発し、これを用いて設計要素がハイリスク事象探索に及ぼす影響を明らかにする。

(4) 海外出張し、国際会議で研究成果を発表し、専門家のコメントを受けるとともに関連機関を訪問して研究情報を収集し、以後の研究活動に反映させる。

4. 研究成果

(1) フォールト発生時における電力系統ハイリスク事象の効率的探索手法

開発した手法の概要は以下の通りである。

①負荷の確率密度関数の生成

対象としている電力系統の負荷変動データを季節や時刻によって負荷が相似的に変動するデータと非相似的に変動するデータに分離し、負荷の確率密度関数を求める。

②代表フォールトの選定

1) 系統で発生しうる全てのフォールトを列挙し、種類と発生箇所に基づいて分類する。

2) 最も高いリスクイベントを生じるフォールトの種類を定格時におけるフォールト発生後の系統模擬結果より生成した臨界故障除去時間(これ以上故障除去が遅れると過渡安定度が損なわれる限界の時間)に基づいて選定する。

3) 最も高いリスクイベントを生じるフォールトの発生箇所を定格時におけるフォールト発生後の系統模擬結果より生成した臨界故障除去時間に基づいて選定する。

4) 上記2)、3)の結果に基づいて代表フォールトを選定する。

③代表フォールトの設定

次に評価する代表フォールトを設定する。

④イベントツリーの生成

最初、全ての保護装置が正常に動作する仮定した場合におけるイベントツリーを作成し、次に保護装置の信頼度解析を行い、解析結果に基づいて保護装置のフォールトを考慮した場合のイベントツリーを作成し、正常時のイベントツリーに追加する。

⑤代表事象の選定

作成したイベントツリーより代表事象を選定する。

⑥代表事象の設定

次に評価する代表事象を設定する。

⑦相似負荷変動パターンにおけるリスクデータの算定

本算定法の概要は以下の通りである。

1) 臨界故障除去時間関数の生成

設定事象を模擬した結果に基づいて事故*i*、ボトム事象*j*の臨界故障除去時間関数 $CCT_{ij}(W)$ を生成する。ここで、 CCT_{ij} は臨界故障除去時間、 W は負荷である。

2) 離散的リスク関数の生成

フォールト*i*、ボトム事象*j*の離散的リスク関数 $R_{ij}(W)$ を次のように生成する。

$$R_{ij}(W) = FiPj \times$$

$$\sum_{m=1}^{m=mt} PL(W)Cijm(W)Rijm(W)Tijm(W)W$$

ここで

W : 負荷

Fi : フォールト群*i*の発生率

Pj : トップイベントからボトムイベント*j*への分岐確率

mt : 不安定モードの総数

$PL(W)$: 負荷の確率密度関数

$Cijm(W)$: 次のように定義される不安定発生判別関数

$CCT_{ijm}(W) - CT > 0$ のとき 0 (安定)

$CCT_{ijm}(W) - CT \leq 0$ のとき 1 (不安定)

$CCT_{ijm}(W)$: フォールト*i*、ボトム事象*j*、不安定モード*m*の臨界故障除去時間関数

CT : 故障除去時間

$Rijm(W)$: 正常時の総発電量に対するフォールト*i*、ボトム事象*j*、不安定モード*m*の喪失発電量の比

$Tijm(W)$: フォールト*i*、ボトム事象*j*、不安定モード*m*の平均フォールト持続時間

3) 負荷変更要求のチェック

負荷のきめ細かさが十分な場合は次ステップへ、さもなければステップ1)へ飛ぶ。

4) リスクデータの算定

i 番目のフォールト群が発生してから当該フォールト群の j 番目のボトム事象に至るまでの代表事象の負荷 k におけるリスク R_{ijk} を次のように算定する。

$$R_{ijk} = \int_{W_{kb}}^{W_{kt}} Rij(W)dt$$

ここで

W_{kb} : 負荷の下限值

W_{kt} : 負荷の上限値

⑧非相似負荷変動パターンにおけるリスクデータの算定

本算定法の概要は以下の通りである。

- 1) 代表非相似負荷変動パターンの選定
- 2) 非相似負荷変動パターンの設定
- 3) 平均供給支障量の算定
- 4) 全非相似負荷変動パターンの終了チェック
- 5) リスクデータの算定
- ⑨全代表事象の算定終了チェック
- ⑩全代表フォールトの算定終了チェック
- ⑪ハイリスク事象の同定

算定した全てのリスクデータをリスク値の高い順にソートし、ハイリスク事象を同定する。

(2) フォールト発生時における電力システムハイリスク事象の効率的探索手法のモデルシステムへの応用

開発した手法を図1に示すモデルシステム1に適用した。

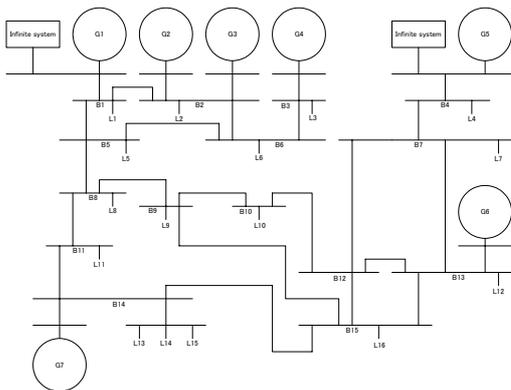


図1 モデルシステム1の構成

適用の結果、次の事項が明らかになった。

- ①開発した手法により大規模電力システムのハイリスクを確実かつ効率的に探索できる。
- ②システムで発生しうる全てのフォールトの中から事前に代表フォールトを選定する手法は網羅的手法と比べて探索コストを大幅に減少することができる。このため、本手法は

大規模電力システムに特に有効である。

③定格時におけるフォールト発生後の系統模擬結果より生成した臨界故障除去時間に基づいて代表フォールトを選定する方法は有効である。

④相似負荷パターンにおいて母線3に三相地絡フォールトが発生し、保護システムが正常に動作したにもかかわらず、過渡安定度が喪失した時が最もリスクが高い。このイベントにおける各発電機の臨界故障時間関数を図2に示す。発電機1, 5は無限大母線に接続しているため、常に不安定である。

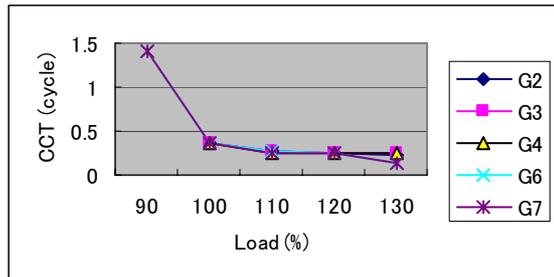


図2 各発電機の臨界故障時間関数

⑤故障除去時間を変化させた場合の母線における三相地絡フォールト1回当たりの離散的リスク関数を図3に示す。単位はサイクル(60分の1秒)であり、リスクはフォールト1回当たり、定格負荷と同じ電力の供給支障が1時間継続した場合を100%として相対的に表現している。

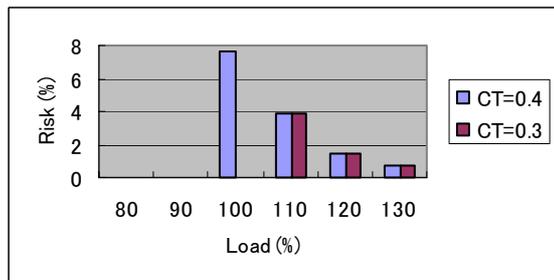


図3 故障除去時間を変化した時の離散的リスク関数

(3) 自然災害発生時における電力システムハイリスク事象の効率的探索手法

本手法の概要は以下の通りである。

- ①負荷の確率密度関数の生成
- ②代表自然災害の選定

ハイリスク事象を生起させ得る代表自然災害を次の手順に従って選定する。

1) 自然災害の列挙

電力システムにフォールトを発生しうる自然

災害を漏れなく列挙し、自然災害の種類とレベルにより分類する。具体的自然災害としては地震、台風、豪雪、雷などが挙げられる。

2) 代表自然災害の決定

電力系統の地域性、ハイリスク事象を生起させる可能性を考慮して評価すべき代表自然災害を決定する。

③代表自然災害の設定

次に評価する代表自然災害の種類とレベルを設定する。

④自然災害のイベントツリーの生成

設定した種類とレベルの自然災害をトップ事象、その自然災害によって発生するフォールト群をボトム事象とするイベントツリーを生成する。

⑤代表フォールト群の選定

作成したイベントツリーより、評価する代表フォールト群を決定する。

⑥代表フォールト群の設定

次に評価する代表フォールト群を設定する。

⑦代表フォールト群のイベントツリーの生成

最初、全ての保護装置が正常に動作すると仮定した場合におけるイベントツリーを作成し、次に保護装置の信頼度解析を行い、解析結果に基づいて保護装置のフォールトを考慮した場合のイベントツリーを作成し、正常時のイベントツリーに追加する。

⑧代表事象の選定

作成したイベントツリーより代表事象を選定する。

⑨代表事象の設定

次に評価する代表事象を設定する。

⑩相似負荷変動パターンにおけるリスクデータの算定

⑪非相似負荷変動パターンにおけるリスクデータの算定

⑫全代表事象の算定終了チェック

⑬全代表フォールト群の算定終了チェック

⑭全代表自然災害の算定終了チェック

⑮ハイリスク事象の同定

算定した全てのリスクデータをリスク値の高い順にソートし、ハイリスク事象を同定する。

(4) 自然災害発生時における電力系統ハイリスク事象の効率的探索手法のモデル系統への応用

開発した手法を発電機3台より構成されるモデル系統2に適用した。

地震と雷を代表自然災害に選定し、適用した結果、次の事項が明らかになった。

①開発した手法により自然災害発生時にお

ける電力系統のハイリスクを確実にかつ効率的に探索できる。

②探索手法は、ステップ①から⑤までの「自然災害に起因する代表フォールト群選定部（前半部）」とステップ⑥から⑮までの「代表フォールト群により生起するハイリスク事象同定部（後半部）」に分けられ、前者は後者に比べて圧倒的に不確定性が高い。このことを考慮し、前半部は悲観から楽観まで必要に応じて複数のケースを設定し、後半部の結果と組み合わせることにより、自然災害に起因する電力系統ハイリスク事象を探索するのが合理的である。

③探索結果の妥当性は自然災害データの精度に大きく依存する。特に、大地震など、頻度が小さいが被害が甚大な自然災害データの精度を向上させることが必要である。

(5) ハイリスク事象探索に及ぼす設計要素の影響評価手法

①詳細評価をする全設計要素の選定

評価すべき設計要素は多く、それらの全てを詳細に評価するのは、効率が悪い。そこで、予備評価を行い、詳細評価する全設計要素を選定する。

1) 予備評価する設計要素の設定

2) 設定した設計要素に対応する臨界故障除去時間の算定

負荷の確率密度関数において高い値をとる負荷（一般には定格負荷の近傍）において、厳しい事故が発生したケースに限定して設定した設計要素に対応する臨界故障除去時間を算定する。

3) 詳細評価する設計要素の選定

臨界故障除去時間に対する影響が大きい設計要素ほどリスクを低減させるのに有効であることを考慮し、必要なだけ1)から2)を繰り返すことにより詳細評価する全設計要素を選定する。

②詳細評価する設計要素の設定

選定した設計要素の中からリスクの低減効果と評価コストを総合的に勘案し、有効性の高いものを優先的に設定する。

③設定した設計要素の分類

影響評価するために、探索のどのステップを実行する必要があるかどうかの観点から設計要素を次のように分類する。

1) カテゴリー1

系統構成など

2) カテゴリー2

発電機や送電線などの構成機器、制御システム、保護システムなど

3) カテゴリー3

負荷の確率密度関数、フォールトの発生率、保護システムの信頼度など

④カテゴリーに基づくハイリスク探索

1) カテゴリー1の場合

系統構成を変更する場合、現状の電力系統の探索データを活用できないので、新たに探索の全ステップを実行する。

2) カテゴリー2の場合

制御システムなどを変更する場合、フォールト発生後の過渡事象シミュレーションを実行し、リスクデータを新たに算定することは不可欠である。ただし、他のデータは現状の電力系統の探索データを可能な限り活用する。

3) カテゴリー3の場合

負荷の確率密度関数などを変更する場合、当該データの生成・収集は不可欠であるが、過渡事象シミュレーションの実行は不必要であり、数式を用いてリスクデータを新たに算定すればよい。

⑤全設計要素の評価終了チェック

(6)ハイリスク事象探索に及ぼす設計要素の影響評価手法のモデル系統への応用

設計要素として発電機を制御する後述する4種類の励磁機を選定し、開発した手法をモデル系統2に適用した。評価した励磁機は次の通りである。

None：励磁機は使用せず、励磁電圧を初期状態電力に見合った一定値に保持

M1：回転励磁機によって連続に動作する励磁システム

M4：1967年以前の非連続に動作する励磁システム

M9：発電機が専用の変圧器を持つ、M1の特殊ケース

適用の結果、次の事項が明らかになった。

①開発した手法を用いて電力系統のハイリスク探索に及ぼす設計要素の影響を確実かつ効率的に評価することが可能である。

②臨界故障除去時間関数を用いることにより、保護装置の設計目標である故障除去時間の変更がリスクへ与える影響を容易に評価可能である。

③励磁機による臨界故障除去時間関数の変化を図4に示す。

④励磁機による故障除去時間(CT)-リスク関数の変化を図5に示す。

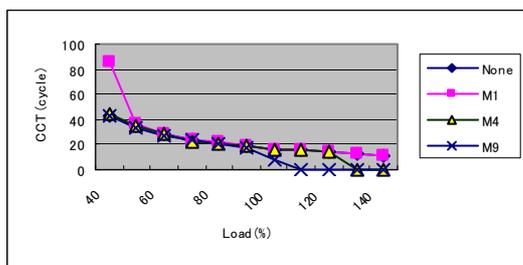


図4 励磁機を変更した時の臨界故障時間関数

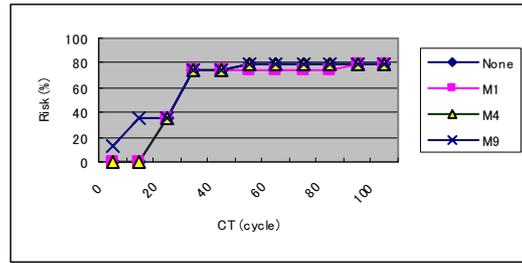


図5 励磁機を変更した時の故障除去時間(CT)-リスク(Risk)関数

(7) 本研究のまとめ

開発した諸手法をモデル系統へ適用した結果、それらの有効性が確認できた。国内外の学会で本研究を外部発表したところ、電力系統のリスクを的確に評価可能な、時代に即した、この分野における革新的研究であると評価された。本研究をさらに発展させるために、今後、次の課題に取り組む必要がある。

①電力系統のハイリスク事象の探索に留まらず、過渡安定度を向上させてハイリスク事象のリスクを的確に低減させることを目指した「電力系統過渡安定度向上方策の優先順位決定」と題する研究を遂行する。

②電力系統ハイリスク事象探索に必要なデータとしてフォールト発生率、フォールト持続時間、負荷データ、自然災害データなど多様なものが挙げられるが、これらに関する信頼度の高いデータベースを構築する。

③周波数や電圧の異常変化など過渡安定度喪失以外の事故波及事象にも拡張する。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 13 件)

① T. Miki, Consideration of Uncertainty Factors in Search for High Risk Events of Power Systems Caused by Natural Disasters, WSEAS Transactions on Power Systems, 査読有り, Vol.3, 2008, pp.76-81

② T. Miki, The Efficient Offline Search System for High Risk Events of Power Systems Caused by Natural Disasters, WSEAS Transactions on Power Systems, 査読有り, Vol.3, 2008, pp.267-276

③ T. Miki, The Efficient Search Method for High Risk Events of Power Systems Caused by Natural Disasters, Proceedings of The 7th WSEAS International Conference on Instrumentation, Measurement, Circuits and Systems, 査読有り, Vol.1,

- 2008, pp.105-110
- ④ T.Miki, The Effect Assessment Method of Control Systems for Turbo-generators on Transient Stability of Power Systems, Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 査読有り, Vol. WD2-1, 2008, pp. 1-6
 - ⑤ T.Miki, The Effect Assessment Method of Design Factors on Search for High Risk Events of Power Systems, Proceedings of The 7th WSEAS International Conference on Computational Intelligence, Man-machine Systems and Cybernetics, 査読有り, Vol. 1, 2008, pp. 35-40
 - ⑥ T.Miki, The Efficient Offline Search System for High Risk Events of Power Systems Caused by Transient Stability, Proceedings of The 5th IEEE International Conference on Industrial Informatics, 査読有り, Vol. 1, 2007, pp. 399-404
 - ⑦ T.Miki, The Efficient Search Method for High Risk Events of Power Systems Caused by Natural Disasters, Proceedings of The 7th WSEAS International Conference on Power Systems 査読有り, Vol. 1, 2007, pp. 168-173
 - ⑧ T.Miki, The Efficient Search Method for High Risk Events of Power Systems by Use of Knowledge Bases, Proceedings of The 5th WSEAS International Conferences on Instrumentation, Measurement, Circuit and Systems, 査読有り, Vol. 1, 2006, pp. 150-155
 - ⑨ T.Miki, The Efficient Search Method for High Risk Events of Power Systems with Similar and Non-similar Load Change Patterns, WSEAS Transactions on Power Systems, 査読有り, Vol. 1, 2006, pp. 721-726
 - ⑩ T.Miki, The Efficient Search Method for High Risk Events of Power Systems by Using Simulation Results of Transient Phenomena, JSST2006 (Asian Simulation Conference 2006) Book of Poster Abstract, 査読有り, Vol. 1, 2006, pp. 37-38
 - ⑪ T.Miki, The Efficient Search Method for High Risk Events of Power Systems Resulted from the Loss of Transient Stability Caused by Natural Disasters, Proceedings of The IERE Eastern Asia Forum, 査読有り, Vol. FS-2, 2006, pp. 17-26
 - ⑫ T.Miki, H. Ishii, K. Sasayama, The

Pattern Recognition of Critical Fault Functions by Using Neural Networks, Proceedings of First Korea-Japan Workshop on Pattern Recognition, 査読有り, Vol. 1, 2006, pp. 8-14

- ⑬ 三木、樫葉、非相似負荷変動パターンを考慮した電力系統ハイリスク事象の効率的探索、阿南工業高等専門学校研究紀要、査読有り、43号、2007年、pp. 8-14

[学会発表] (計 3 件)

- ① 三木、清水、田中、藤井、電力系統のハイリスク事象探索に及ぼす制御システムの影響評価手法、第51回自動制御連合講演会、2008年11月23日、山形大学工学部(米沢市)
- ② 三木、清水、藤井、田中、自然災害に起因する電力系統ハイリスク事象の効率的探索手法、電子情報学会研究報告会、2008年3月27日、機械振興会館(東京都)
- ③ 三木、鈴木、大和、稲井、猪尾、藤川、過渡安定度に及ぼす不確定要因、平成19年度電気関係学会四国支部連合大会、2007年9月29日、徳島大学(徳島市)

[その他]

<http://www.anan-nct.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三木 哲志 (MIKI TETSUSHI)

阿南工業高等専門学校・電気電子工学科・教授

研究者番号：70290806