

パキスタン国営送電会社 電力系統運用訓練シミュレーター

Power Grid Operation Training Simulator System for National Transmission & Despatch Company in Pakistan

杉山 博昭 SUGIYAMA Hiroaki 稲垣 淳一 INAGAKI Junichi 春日 研 KASUGA Ken 吉田 和芳 YOSHIDA Kazuyoshi

電力系統を安定して運用するには、運用者に高度な知識と運用技術が求められることから、運用者を育成するために、電力系統監視制御システムとほぼ同等の機能を持つ電力系統運用訓練シミュレーターが使用されている。

この度、東芝エネルギーシステムズ(株)は、パキスタン・イスラム共和国(以下、パキスタンと略記)の国営送電会社(NTDC: National Transmission & Despatch Company Limited)に電力系統運用訓練シミュレーターを納入した。変電所運転訓練シミュレーターと保護リレー運転訓練シミュレーターから成り、前者はNTDCの主要な系統と変電所を模擬し、電圧潮流計算、周波数計算、及び系統事故発生時の保護リレーの応動模擬を行うことで変電所の運転操作訓練を目的としており、後者は実保護リレーをRTDS (Real Time Digital Simulator)に接続し、各種系統事故での保護リレー応動の理解を目的としている。このシミュレーターを用いた訓練により、運用の習熟と系統事故解析・評価能力の向上が図れ、迅速な系統復旧が可能になり、パキスタンの電力の安定供給と信頼度向上に貢献すると期待される。

In order to secure the stable operation of electric power transmission and distribution systems, it is essential for the operators of such systems to possess high levels of skill and knowledge of power grids. This has led to the need for systematic human resource development using operation training simulators equipped with functions equivalent to those of a supervisory control system for power grids.

Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation has delivered a power grid operation training simulator system to National Transmission & Despatch Company (NTDC) in Pakistan. This system consists of two simulators: (1) a substation operation training simulator with simulated functions of main grids and substations that provides trainees with the results of calculations of control parameters including voltage, power flow, and frequency and with the protection relay response in the event of a power system fault; and (2) a protection relay operation training simulator that provides trainees with a better understanding of relay operations in response to a variety of power system faults that could occur on a power grid by connecting actual protection relays to a real-time digital simulator (RTDS). This system is expected to contribute to improvements in the reliability and power security of electric grids in Pakistan by increasing the number of skilled operators, resulting in rapid recovery from problems.

1. まえがき

電力系統が時々刻々と変動する中で、電力系統の高度な知識と運用技術を備えた運用者が、中央給電指令所や各制御所に設置された電力系統監視制御システムを運用することで、電力安定供給が維持できている。運用者の習熟には、訓練の積み重ねが必要であるが、実システムは訓練に活用できないため、我が国では電力系統監視制御システムとほぼ同等の機能を備えた電力系統運用訓練シミュレーターを用いて教育や訓練が行われている。

一方、海外、特に新興国では、高い経済成長に伴う電力需要の急増とともに、系統規模が急激に拡大しているため、短期間で運用者を育成する必要に迫られているが、我が国のような電力系統運用訓練シミュレーターを導入できて

いない国も多い。そのため、効果的かつ効率的に運用者の教育・訓練を行える電力系統運用訓練シミュレーターの需要が見込まれる。

このような中、我が国の無償資金協力事業として、東芝エネルギーシステムズ(株)は、パキスタンのNTDC用に、電力系統運用訓練シミュレーターを開発し、納入した。ここでは、この電力系統運用訓練シミュレーターの概要と、今後の展開について述べる。

2. 電力系統運用訓練シミュレーター導入の背景

パキスタンでは、送配電系統の非効率な運用による送電ロスや、停電の発生、拡大する電力需要に対する供給量不足などが問題となっており、安定した電力供給を可能とするには、送配電設備の更新・新設と、それに合わせた運用者

の能力向上や増員が不可欠となっている。しかし、NTDCでは、変電所が計画停電などで休止している間に、休止した監視制御設備を使って運用者の教育を行っているという状況のため、事故発生時の対処などについては十分な訓練が行われていない。そこで、NTDCの研修センターに電力系統運用訓練シミュレーターを導入して同社の研修コースを充実させることで、効果的かつ効率的な運用者の能力向上、スキルの高い運用者の増員を実現することが可能となる⁽¹⁾。

電力系統運用訓練シミュレーターは、変電所の操作訓練を目的とした“変電所運転訓練シミュレーター”と、保護リレーの整定訓練を目的とした“保護リレー運転訓練シミュレーター”から成る。変電所運転訓練シミュレーターと保護リレー運転訓練シミュレーターのそれぞれについて、以下に述べる。

3. 変電所運転訓練シミュレーター

3.1 システム概要

このシステムの特長としては、以下の4点が挙げられる。

- (1) 電圧潮流計算や周波数計算による系統模擬が可能
- (2) 系統事故発生時の保護リレーの応動模擬が可能
- (3) インラッシュ電流模擬や、パワースイング模擬、分離系統の同期投入模擬などの特殊な訓練が可能
- (4) トレーナーによるトレーニングや単独での自習など、様々な形態の訓練が可能

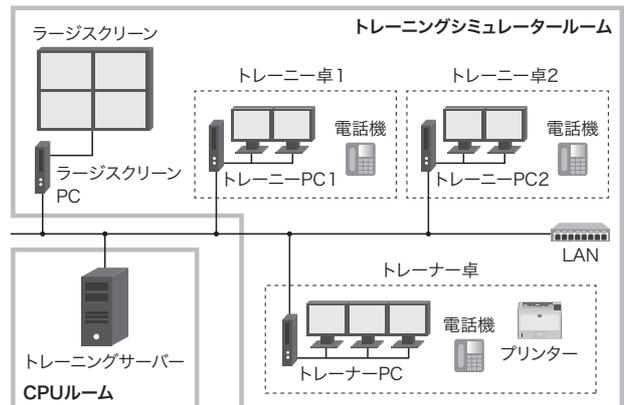
これらの特長により、①事故時の応動が模擬できるため、系統運用や保護リレーの専門家が複雑な訓練シナリオを作成しなくても、本格的な訓練ができることや、②Windows環境で動作可能なためシステム導入や操作が容易で、教育機関での学習に活用できる、などのメリットを提供できる。

3.2 システム構成

変電所運転訓練シミュレーターのシステム構成を図1に示す。

このシミュレーターは、主として、CPUルームにトレーニングサーバーが設置され、トレーニングシミュレータールームにクライアントと入出力装置が設置される構成となっている。トレーニングを実現するソフトウェアは、全てトレーニングサーバーに搭載され、クライアントは、シンクライアントによる画面表示だけを行う構成なので、容易にトレーナー卓の増設が可能である。

訓練を実施するトレーニングシミュレータールームには、全系系統図やトレーナー卓とトレーニー卓の切り替え表示を行うラージスクリーン、訓練シナリオの作成や系統模擬・操作及び訓練評価を行うトレーナー卓、系統操作訓練や、平



PC:パソコン

図1. 変電所運転訓練シミュレーターのハードウェア構成

トレーニングサーバーや、トレーナー卓、トレーニー卓などで構成される。トレーニングを実現するソフトウェアは、全てトレーニングサーバーに搭載されており、容易にトレーニー卓を増設できる。

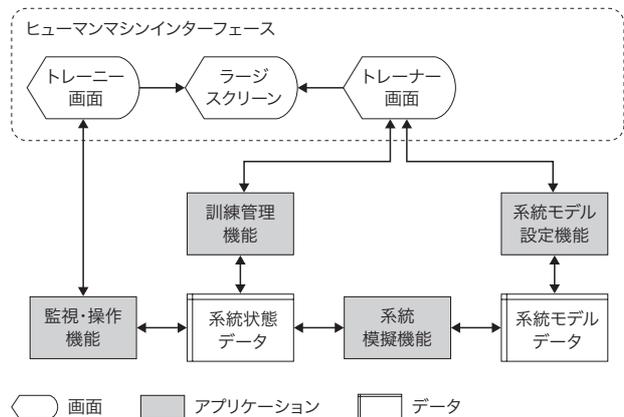
Hardware configuration of substation operation training simulator

常時操作訓練、事故復旧訓練などを行う二つのトレーニー卓が設置されている。

周辺機器としては、専用線で接続された電話機がトレーナー卓とトレーニー卓に設置され、訓練時のトレーナーとトレーニー間での通話が可能となっている。

3.3 訓練機能

変電所運転訓練シミュレーターは、図2に示す機能から構成される。各機能の詳細を以下に記述する。



画面 アプリケーション データ

図2. 変電所運転訓練シミュレーターのソフトウェア構成

シミュレーターのメイン機能である系統模擬機能のほか、監視・操作機能、訓練管理機能、系統モデル設定機能と、ヒューマンマシンインターフェースで構成されている。

Software configuration of substation operation training simulator

3.3.1 系統模擬機能

このシミュレーターのメイン機能である。訓練の実行中は、3秒周期で系統事象の模擬を行う処理を繰り返す。系統状態を基に、電圧潮流計算・周波数計算・故障計算・保護リレー応動模擬・インラッシュ電流模擬・パワースイング模擬を実行する。

- (1) 電圧潮流計算 各開閉器の開閉状態と、発電機及び負荷の有効・無効電力と電圧、調相設備の無効電力と変圧器のタップ比を入力として、各母線の電圧値と位相角、各送電線及び変圧器の潮流値(有効電力や無効電力)を計算する。
- (2) 周波数計算 対象系統内の負荷の合計値と全発電機の出力合計値との差(需給インバランス)から系統周波数を求める。この際、周波数偏差に応じた、発電機のカバーによる出力変化も模擬する。
- (3) 故障計算 発電機と設備のインピーダンスデータから作成されたノードの電圧-電流方程式と、故障モードの間のスイッチング条件を解くことにより、故障電流や、各母線の三相の電圧絶対値と位相角、各端子の現在の絶対値と位相角などを計算する。
- (4) 保護リレー応動模擬 保護リレー(送電線、配電線、母線、変圧器)、遮断器不動作対策保護リレー、及び周波数リレーの模擬を行う。リレー装置、要素ごとに事前に定義されたリレー特性、整定値と周波数計算、電圧潮流計算と故障計算の結果から動作リレーを判定し、トリップシーケンスを基に、トリップさせる遮断器の有無や対象を決定する。
- (5) インラッシュ電流模擬 変圧器の充電操作を行った場合に、変圧器のインラッシュ電流値を模擬する。また、オシロスコープウインドウにこれらの挙動を表示できる。
- (6) パワースイング模擬 シナリオ上でパワースイングの発生イベントを設定した場合に、指定された機器の有効電力、無効電力、及び位相の振動を発生させ、トレンドグラフで表示できる。

3.3.2 監視・操作機能

監視・操作機能は、トレーニー卓での訓練実施(監視や操作)に関わる機能であり、変電所・発電所の状態監視及び機器の操作を行う。トレーニー卓の画面表示例を図3に示す。

- (1) 系統状態表示 訓練対象の変電所を構成する機器を単線結線図で表示し、機器の各計測値及び状態

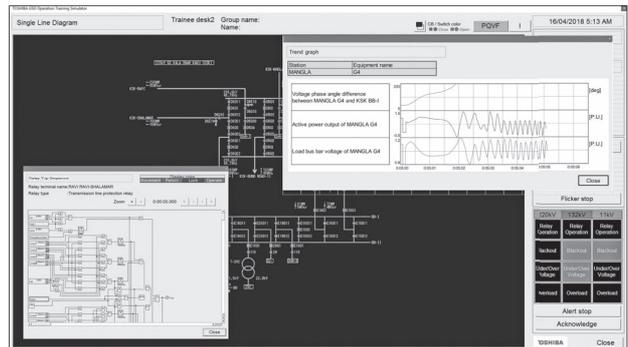


図3. 変電所運転訓練シミュレーターの画面例

変電所単線結線図による監視制御やトレンドグラフのほか、保護リレートリップシーケンス図などが、トレーナー卓及びトレーニー卓で画面表示できる。

Example of substation operation training simulator display

を表示する。計測値は、系統模擬機能の計算結果に従って更新され、機器の開閉状態や充電電状態を表示する。

- (2) 状態・数値監視 訓練対象の変電所における設備の装置状態及び各種計測値を継続的に監視する。状態変化や監視値の逸脱が発生した場合は、“イベント&アラームリスト”へのメッセージを出力するとともに、シンボルフリッカーや警報出力による通知を行う。
- (3) 機器操作・制御 訓練対象の変電所の機器(遮断器、断路器、及び変圧器タップ)の操作を行う。また系統状態と操作の内容をチェックし、インターロック条件に該当する場合はその操作を中断し、イベント&アラームリストへのメッセージ出力と警報出力を行う。

3.3.3 訓練管理機能

訓練管理機能は、トレーナーによる訓練データ・シナリオの作成、訓練シナリオの実行管理と、訓練実行後の評価を行う。

- (1) 初期系統作成 訓練開始時における系統の状態を設定し、系統構成パラメーターや、発電機出力パラメーター、負荷パラメーターなどのデータを初期系統データとして設定し、保存できる。
- (2) リレー整定データ作成 訓練実行中に模擬する保護リレー装置の整定値や、タイマー、使用/ロックなどのパラメーターを設定する。
- (3) シナリオ作成 訓練実行中に発生させるイベントをシナリオデータとして設定し、保存できる。イベントには、イベント発生時刻、対象機器、イベント内容、故障点情報を登録する。

- (4) 訓練実行管理 訓練シナリオのうち、1ケースを選択して訓練開始、中断、再開、終了を行える。また、訓練実行中に新たな機器の状態変化を追加できる。
- (5) 訓練評価レポート 訓練終了後にトレーナーがトレーニーのトレーニング結果を評価する機能である。訓練中に記録されたデータや、事故の状況、制御の結果などのログを訓練評価レポート及びイベント&アラームリストとして帳票出力することができる。

3.3.4 系統モデル設定機能

系統モデル設定機能は、トレーナー卓からの操作により、系統モデルに含まれる各種設備の定数と、系統模擬に必要なパラメーターを設定し、保存する。

- (1) 設備定数データ設定 発電機や、変圧器、送電線、母線、遮断器、調相設備などの定数データを設定する。
- (2) 系統模擬パラメーター設定 系統模擬における各種計算に使用する系統定数や、負荷変動定数、同期検定器、並列可能位相差などのパラメーターを設定する。

4. 保護リレー運転訓練シミュレーター

4.1 システム概要

保護リレー運転訓練シミュレーターは、電力系統の地絡や短絡事故などの過渡現象を計算できるRTDS Technologies Inc.製のRTDSを適用し、その出力の電流、電圧を実適用している保護リレーに導入することで、リレーの応動評価を可能としたシステムである。

このシステムの特長としては、以下の4点が挙げられる。

- (1) 実系統に合わせた系統定数設定が可能である。
- (2) 事故は、地絡や、短絡、多重事故、進展事故など様々な設定が可能である。
- (3) 実リレーの応動をリアルタイムでシミュレーションにフィードバックできる。
- (4) 系統事故に対応した、リレーのダイナミックな応動評価が可能である。

4.2 システム構成

保護リレー運転訓練シミュレーターのシステム構成を図4に示す。

- (1) RTDS 電力系統を模擬し、地絡や短絡などの系統事故の過渡現象を計算し、その結果を出力する。また、リレー動作結果を系統現象にフィードバックできる。
- (2) コントロールサーバー RTDSの事故ケースや条

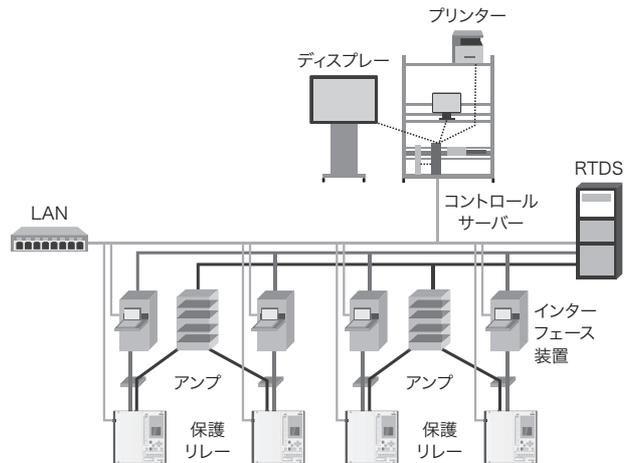


図4. 保護リレー運転訓練シミュレーターのハードウェア構成

RTDS、アンプ、及びインターフェース装置に保護リレーを接続し、コントロールサーバーからトレーニングを行うことができる。

Hardware configuration of protection relay operation training simulator

件などの各種設定やリレー応動結果の表示など、システム全体の制御をつかさどる。

- (3) アンプ RTDSの計算結果の電圧、電流をリレー入力に適した値に増幅する。
- (4) 保護リレー 実系統に適用する保護リレーと同じ保護リレーを適用している。
- (5) インターフェース装置 RTDS又はアンプと保護リレーの間の接続を集約して整線するとともに、保護リレーの動作結果をディスプレイに表示する機能を持つ。このインターフェース装置の機能により、系統構成変更に対応したシミュレーションシステムの構築が短時間で容易にできる。

4.3 訓練機能

各種系統事故の様相とそれに対応した保護リレーの適用、及び設定と応動の妥当性評価が可能である。

- (1) 送電線保護 並行2回線系統の送電線地絡や短絡事故時の送電線保護リレー応動を評価し、事故除去や、再閉路、遮断失敗、後備保護動作など、保護リレーの機能に応じた総合的な動作試験が実施可能である。
- (2) 母線保護 2重母線や単母線などの事故を模擬し、母線保護リレーの応動評価を実施可能である。
- (3) 変圧器保護 単巻変圧器などの変圧器内部事故を模擬し、変圧器保護リレー応動評価を実施可能である。

(4) そのほか 過電流リレーや不足電圧リレーなどを接続することにより、変電所の保護システムを構成しているリレー全般について、応動評価を実施可能である。

5. あとがき

パキスタンのNTDCに、電力系統運用訓練シミュレーターを納入した(図5, 図6)。これにより、2018年秋から同社で開始する運用者トレーニングの準備が整った。運用者の能力向上や系統事故解析・評価能力の向上により、迅速な復旧が可能となるため、パキスタンの電力安定供給の信頼度が向上し、同国発展の一助になることが期待される。



図5. 変電所運転訓練シミュレーター

NTDCに設置した変電所運転訓練シミュレーターである。

Substation operation training simulator Installed at NTDC



図6. 保護リレー運転訓練シミュレーター

NTDCに設置した保護リレー運転訓練シミュレーターである。

Protection relay operation training simulator installed at NTDC

今後は、同様な変電所運転訓練シミュレーターや保護リレー運転訓練シミュレーターの導入が見込まれる新興国へ展開を図っていく。また、変電所運転訓練シミュレーターは、パッケージ化されたソフトウェアで構成されており、導入が容易であること、複雑な準備をせずに訓練を実行可能であることから、変電所を対象にした訓練から、制御所や給電所での訓練にまで拡張し、スマートグリッドへの対応や、PC(パソコン)1台での訓練・学習が可能なスタンドアローン構成などへの改良を進めていく。更に、新興国だけでなく、国内の電力会社や教育機関での電力系統の学習にも活用できる、幅広く活用可能なツールとして整備を進めていく。

文献

- (1) 国際協力機構(JICA), ほか, パキスタン・イスラム共和国送変電設備維持管理研修所強化計画準備調査報告書, JICA, 2016, 223p. <http://open_jicareport.jica.go.jp/pdf/12253555.pdf>, (参照 2018-08-01).



杉山 博昭 SUGIYAMA Hiroaki
東芝エネルギーシステムズ(株)
電力流通システム事業部
システムソリューション技術部
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



稲垣 淳一 INAGAKI Junichi
東芝エネルギーシステムズ(株)
府中工場
電力システムシステム部
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



春日 研 KASUGA Ken
東芝エネルギーシステムズ(株)
府中工場
電力システム制御部
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



吉田 和芳 YOSHIDA Kazuyoshi
(株)アジア共同設計コンサルタント
海外事業本部
Asia Engineering Consultant Co., Ltd.