

RT Box *DEMO MODEL*

Railway Traction Application Demo

鉄道牽引アプリケーションのデモ

- RT Box 2または3での鉄道アプリケーション向け牽引システムのマルチコアシミュレーション -

Last updated in RT Box TSP 3.0.1

1 はじめに

このデモでは、複数の複雑なコンポーネントを含む大規模なPLECSモデルのリアルタイムシミュレーションにおいて、RT Boxの計算能力を実証するものです。選択されたモデルには、コンバータ、モータ、変圧器、および非理想的なコンポーネントの例として真空遮断器(Vacuum Circuit Breaker: VCB)が含まれます。このような大規模で複雑なモデルは、CPUコアあたりの計算能力の制限により、リアルタイムでシミュレーションするのが困難です。提案する解決策は、簡単に構成できるよう、タスクフレームを使用してモデルを3つの部分に分割することです。各パーツは、RT Box 2または3のCPUコアの1つにデプロイします。マルチコアアプリケーションで選択した離散化ステップサイズと平均実行時間を表1に示します。

このデモに使用するモデルは、架線から給電される走行中の鉄道車両の牽引システムを構成しています。シミュレーションの焦点は、列車が1つの電力供給ラインから別のラインに切り替わる際に生じる短時間の停電直後の瞬間にあります。停電時にはVCBが作動します。シミュレーションでは、停電直後の瞬間に非理想的な振動がシステムの動作に与える影響を示します。

表1: RT Box 2でのデモモデルの離散化ステップサイズと平均実行時間

	Discretization step size	Average Execution Time
Core 0 (Input stage)	5.5μs	5.4μs
Core 1 (Auxiliary stage)	5.5μs	3.0μs
Core 2 (Motor stage)	16.5μs	14.0μs

1.1 要求仕様

このデモモデルを実行するには、次の製品が必要です(www.plexim.comから入手可能):

- 1台のRT Box 2または3、PLECSとPLECS Coderライセンスを1つずつ
- フロントパネルのループバック設定でRT Boxを接続するための37ピンD-Subケーブル1本。
- [RT Box Target Support Package](#)
- RT Box の初期セットアップについては、[RT Box User Manual](#)のクイックスタートガイドに記載されている、PLECSとRT Box の設定手順に従います。

注意 このモデルには、以下からアクセスできるモデル初期化コマンドが含まれています:

PLECS Standalone: シミュレーションメニュー -> シミュレーション・パラメータ... -> 初期化

PLECS Blockset: Simulinkモデルウィンドウで右クリック -> モデル プロパティ -> コールバック -> InitFcn*

1.2 制限事項

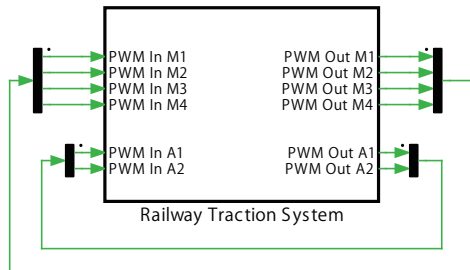
このモデルの焦点は、RT Boxの機能を紹介することです。実際の現実世界での実装を意図していません。したがって、このモデルは鉄道牽引システムの主要コンポーネントのみで構成しています。選択している値も検証しておらず、実際の実装とは異なっています。

さらに、モデルを3つのステージに分割すると、リアルタイムシミュレーションではステージ間の信号伝送にわずかな遅延が生じます。この場合、モデルが分割されているDCリンク電圧量の変化は緩やかなため、遅延はそれほど重要ではありません。

2 モデル

デモモデルの最上位レベルの回路図を[図1](#)に示します。PWM生成と電源回路は同一のRT Box上で実行します。"Railway Traction System"サブシステムは、サブシステムを右クリックして**サブシステム -> 実行の設定...**から**コード生成機能の有効化**にチェックしてサブシステムを原子単位系として構成する必要があります。

図1: 鉄道牽引システムのトップレベルの概略図



2.1 プラント

[図2](#)はプラントの回路モデルを示しています。このプラントは、架線、牽引ユニット、補助装置など、電気機関車の一部を構成しています。モデルは、入力ステージ、牽引ステージ、補助ステージの3つのステージに分かれています。

このモデルでは、ステージはシステム分割メカニズムによって接続されます。これは、Coderが個々のステージごとにコードを生成できるように、個別の状態空間システムを作成するために必要です。システム分割のコンセプトについては、RT Box Target Support Packageの"RT Box 2/3によるグリッド接続型MMCのマルチタスクシミュレーション: Modular Multilevel Converter"デモモデルで説明しています。リアルタイムシミュレーションでは、各ステージはRT Box 2または3の個別のCPUコアに配置されます。

このデモアプリケーションに4つのモータドライブ、1つの3相インバータ、および1つのDC/DC降圧コンバータが含まれている理由は、合計32個のPWMゲート信号が必要であり、これらがRT Box 2のすべてのデジタルI/Oチャネルを利用するためです。

入力ステージ

入力ステージには、架線と、一次巻線、二次巻線、三次巻線を備えた単相変圧器が含まれます。二次巻線と三次巻線は、単相非制御整流ブリッジとDCリンク(この場合はキャパシタ)に接続されます。DCリンク電圧量が緩やかに変化するためステージの分割が可能になります。

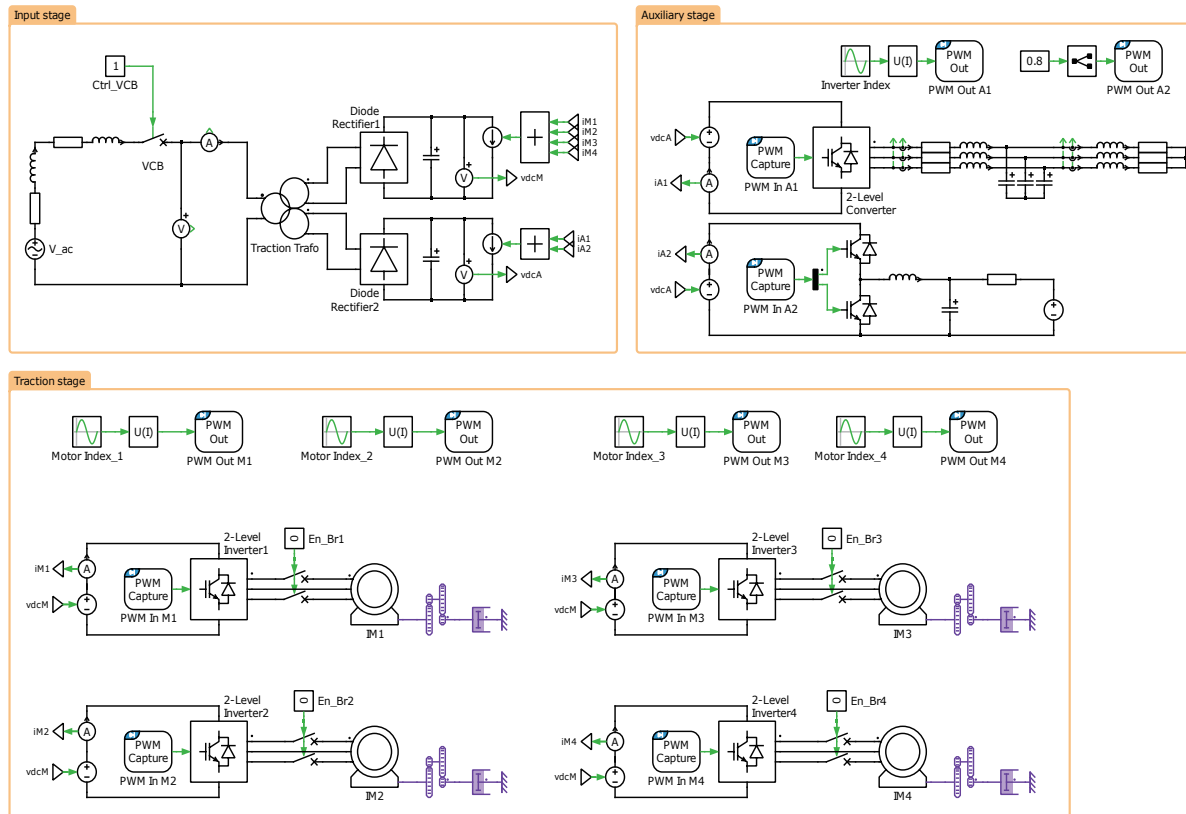
VCBモデルについては[セクション2.3](#)で詳しく説明します。その実装はシステムレベルで行われ、反応依存モデルです。

このデモに使用しているグリッドは、ドイツ、スイス、オーストリアの大部分と同様に、 $16\frac{2}{3}$ Hzで15kVを供給します[\[1\]](#)。

牽引/ステージ

牽引ステージには、誘導機を駆動するインバータが4セット含まれています。インバータはDCリンクから電力を取得します。このデモモデルでは、4つあるトラクションモータのパラメータはすべて同一です。これら4つのモータは合計で約1MWの電力を供給します。さらに、トラクションモータが車輪一組を駆動するのか、それとも単一の車輪を駆動するのかは定義していません。このモデルでは、デジタル入力チャネル数を考慮して、RT Box 2上で可能な限り多くのモータドライブのみを表示しています。ユーザは必要に応じて実装を選択して適用できます。

図2: Railway Traction Systemサブシステムの回路図



補助ステージ

安全性を確保し、RT Box 2または3の負荷を増やすために、モデルには補助ステージも含まれています。これにより、たとえば、DCリンクに作用するすべての負荷要素をモデル化できます。また、停電が補助コンポーネントに与える影響を示すこともできます。補助ステージは、変圧器の二次巻線に接続されたDCリンクから電力を取得します。

補助ステージは、3相インバータとDC/DC降圧コンバータで構成しています。3相インバータはLCフィルタを介してRL負荷に接続しています。降圧コンバータには、列車のバッテリーをモデル化した電圧源が負荷として供給されます。補助ステージは約220kWの電力を供給します。

2.2 コントロール

システムは開ループで動作します。シミュレーションの焦点はシステム全体に伝播するVCBの過渡現象にあるため、閉ループは必要なく、RT Boxの計算リソースを無駄に消費することになります。HILテストの場合、閉ループ制御は通常、RT Boxに接続された外部コントローラに実装されます。

このデモでは、PWM Outブロックを使用して同一Box内でPWM生成を実行します。RT Boxのデジタル出力で生成したPWM信号は、物理的なループバックケーブルを使用してデジタル入力にフィードバックします。これらのPWM信号は、PWM Captureブロックを使用してBoxにサンプリングされます。

牽引ステージでは、誘導機を駆動する3相インバータは、正弦波状に変化する3相PWM変調指数で制御されます。

補助ステージでは、RL負荷を備えた3相インバータも正弦波PWM変調指数で制御されます。降圧コンバータは固定のデューティ比で動作します。

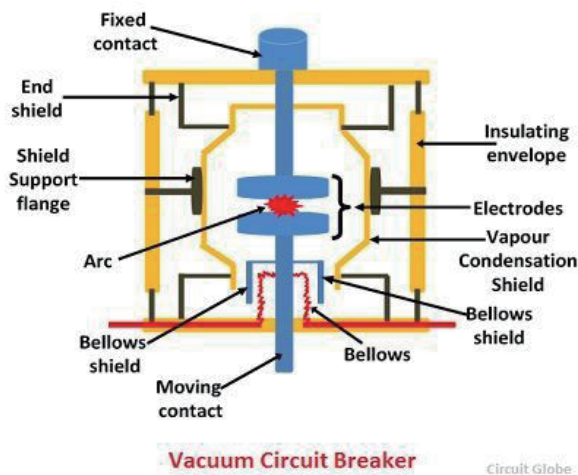
2.3 真空遮断器(VCB)

アークを消滅させる媒体として真空を利用する遮断器を真空遮断器と呼びます。このタイプの回路遮断器では、固定接点と可動接点が永久的に密閉された真空遮断器内に収められています。高真空における接点の分離により、アークは消滅します。高真空は非常に高い誘電強度を持ちます。したがって、真空遮断器は11kVから33kV範囲の中電圧に容易に耐えることができます。

VCBの構築

真空遮断器は、点対称に配置されたセラミック絶縁体内の蒸気凝縮シールドで構成されています。その構造は主に3つの部分(固定接点、可動接点、およびシールド)に分かれており、真空バルブ内に配置されています。図3にVCBの断面図を示します[2]。

図3: 真空遮断器の構造の断面図



VCBの動作原理

システムに障害が発生すると、可動接点が固定接点から離れます。接点が離れるとアークが発生します: 接点が離れ始めても、電流はまだ流れています。そのため接点の温度が高くなり、イオン化が発生します。イオン化により、接点間の空間は陽イオンの蒸気で満たされます。これらのイオンは接点の材料から放出されます。

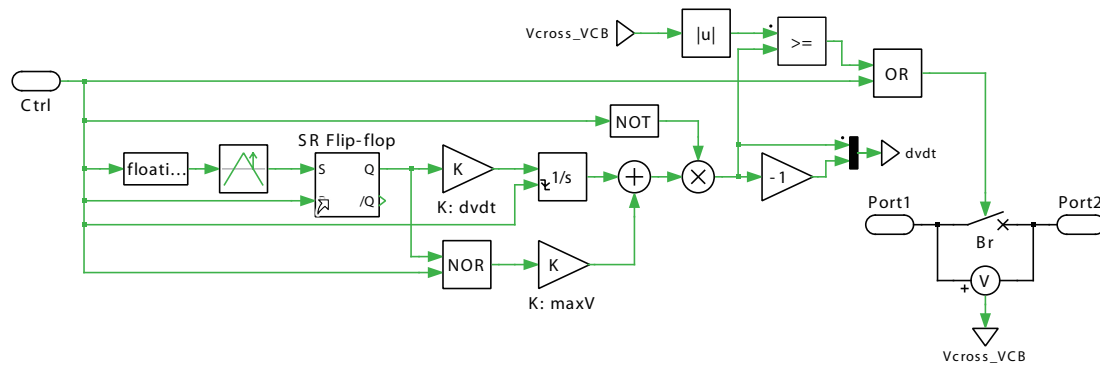
蒸気の密度はアーク内の電流に依存します。電流値が減少するため、蒸気の放出率は低下します。電流がゼロになり、接点周辺の蒸気密度が十分に減少すると、遮断器はすぐに完全な絶縁耐力を回復します。この急速な回復はガス分子が存在しないためであり、蒸発した金属は急速に拡散します。したがって、アークは再び発生しません。

絶縁強度の回復率は、VCBサブシステムのマスクダイアログの"Voltage rise slope during quenching"フィールドの変数によって表されます。このVCBモデルでは100 V/msを選択しています。モデルでは、VCBの最大耐電圧は30kVに設定されています。

VCBのモデリング

VCBのモデリングは、追加の制御回路を備えた PLECSブレーカーコンポーネントに基づいて実装されています。VCBサブシステムマスクの下の回路図を図4に示します。このブレーカーの制御回路は、上で説明した主な動作原理を表しています。**Ctrl**入力信号ポートは、VCBのオン/オフ信号を制御するブール信号を受信します。

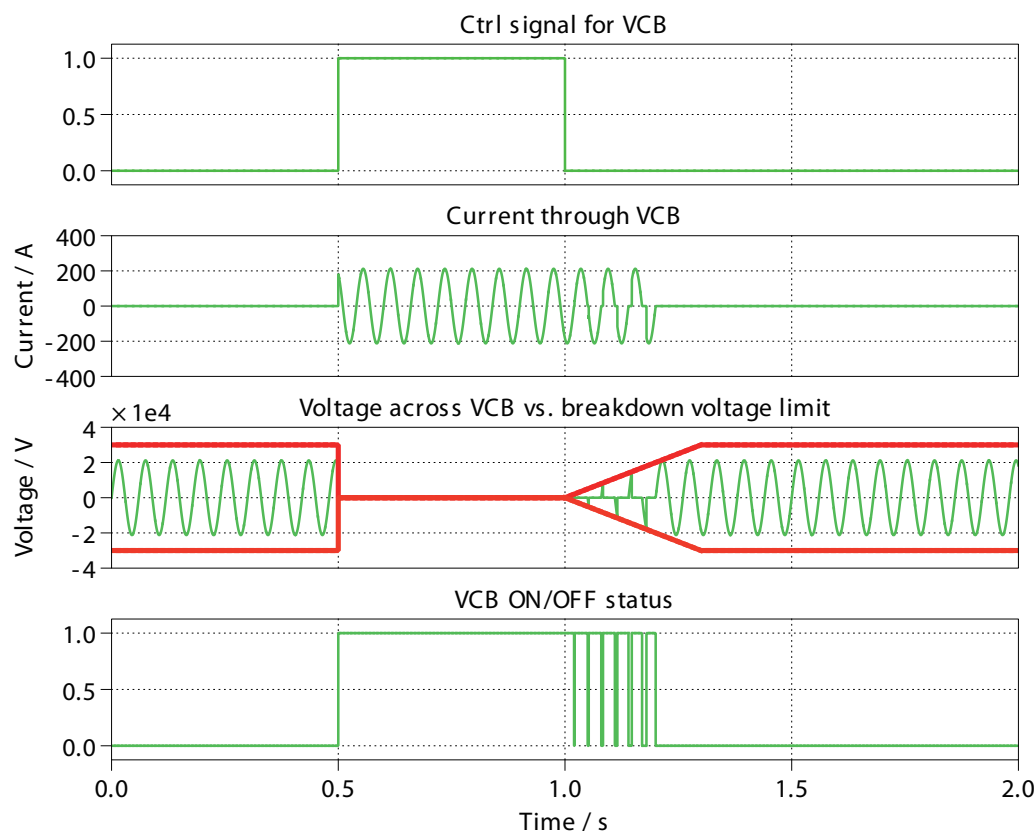
図4: VCBサブシステムの回路図



絶縁耐力の回復は、スルーレートを"voltage rise slope during quenching"として積分器でモデル化します。最大耐電圧で積分動作は停止します。

NOR論理演算子は、VCBが静的にオフ状態のときに最大耐電圧を保証します。したがって、乗算(円形)コンポーネントの出力は、VCBの動的絶縁破壊電圧の制限をモデル化します。

図5: 異なる制御信号状態におけるVCBモデルの波形



関係演算子(>=)は、VCB間の測定電圧が動的絶縁破壊電圧の制限を超えた場合のシナリオをモデル化し、VCBは一時的にオン状態に戻ります。オンとオフの状態を交互に繰り返すサイクルを数回続き、最終的にライン電流は正常に遮断されます。この動作はVCBのCtrl信号がOFF-ON-OFF状態を行う、[図5](#)のオフラインシミュレーションで示されています。

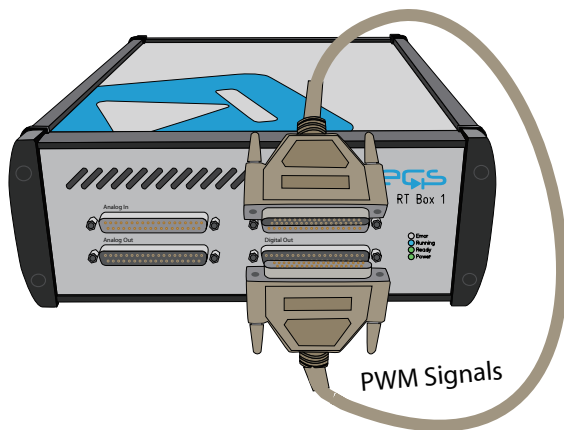
3 シミュレーション

このセクションでは、モデルの主な動作シナリオについて説明します。このモデルは、コンピュータ上のオフラインモードでも、PLECS RT Box 2または3上のリアルタイムモードでも実行できます。

RT Boxでリアルタイムモードを実行するには、以下の手順に従ってください:

- [図6](#)に示すように、DB37ケーブルを使用して、Digital Inインタフェースを RT BoxのDigital Outインタフェースに接続します。
- **Coderオプション...**ウィンドウの**システム**リストから、"Railway Traction System"を選択し、**スケジュール**タブに進みます。タスクモードがマルチタスクになっていることを確認してください。
- **ビルド**をクリックして、モデルをRT Boxにデプロイします。
- モデルをアップロードしたら、**外部モード**タブから RT Boxに**接続**し、**自動トリガを有効化**にチェックします。

図6: デモモデルのリアルタイム動作のためのハードウェア構成



3.1 VCBが作動してモータブレーカが遮断

初期状態では、VCBは正常に電流を流しています。つまり、Ctrl_VCBは1になります。補助ステージのみに電源が投入されていますが、トラクションモータはまだ回路に接続されていません。これは、列車が停止しており、ライトが点灯しているシナリオを表しています。列車は駅から出発する準備ができています。

[図7](#)は変圧器の一次側の電圧と電流波形を示しています。[図8](#)は補助ステージにおける三相インバータの公称動作波形を示します。

3.2 トラクションモータに接続されたブレーカを作動

ここで、列車が走り始めるときのシナリオを表現します。4つの定数ブロック(En_Br1、En_Br2、En_Br3、En_Br4)を同時に選択し、0から1に変更します。この操作により、4つのサーキットブレーカすべてが作動します。各サーキットブレーカは4つのモータのいずれか1つに接続されています。4つのモータが牽引力を生成すると、列車は走り始めます。

図7: VCBがオンだがモータに接続していない状態の牽引変圧器の一次側波形

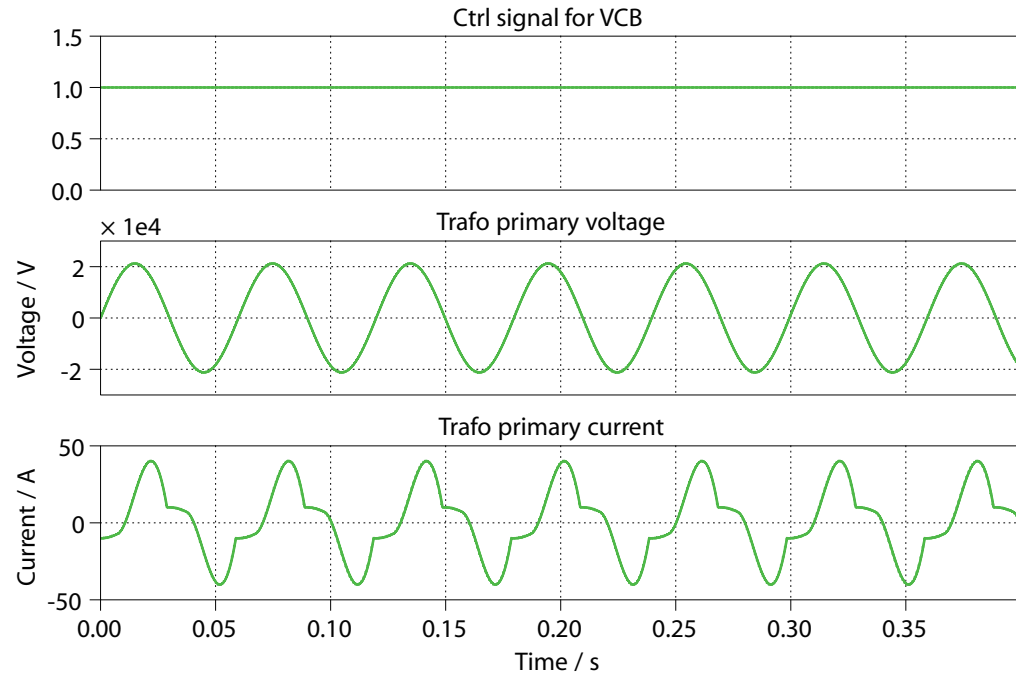


図8: 補助ステージにおける三相インバータの公称動作波形

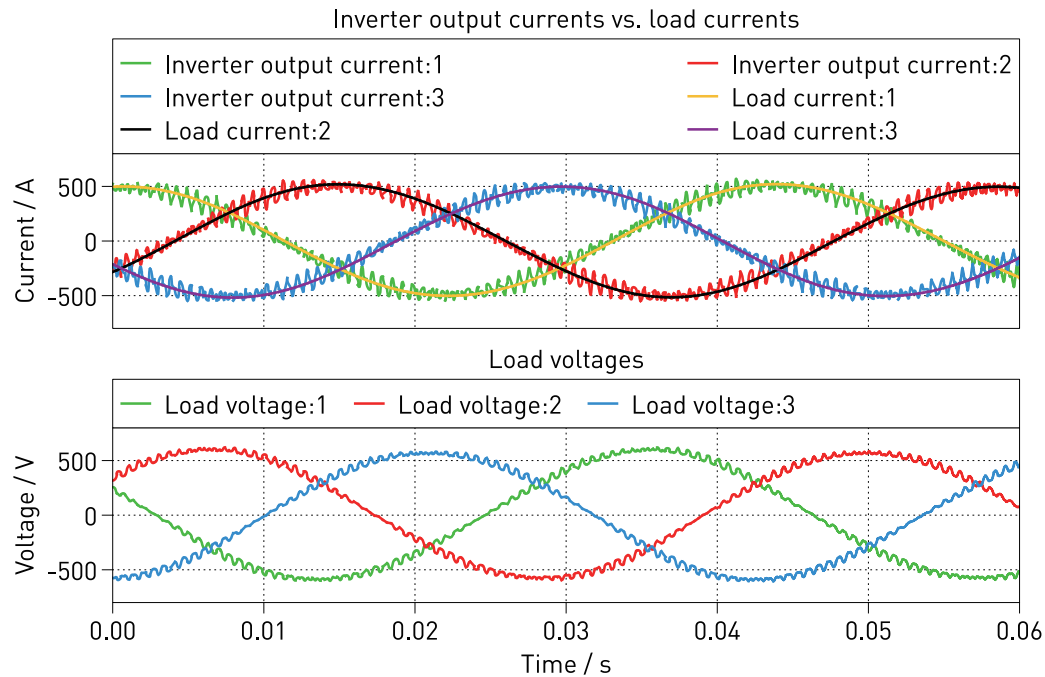


図9は、公称牽引力と補助ステージにおける変圧器一次側の波形を示しています。

図10は、公称牽引力での1台の牽引モータのステータ電流、ロータ位置、および電気トルクを示しています。

図9: 公称牽引力および補助負荷時の牽引変圧器の一次側波形

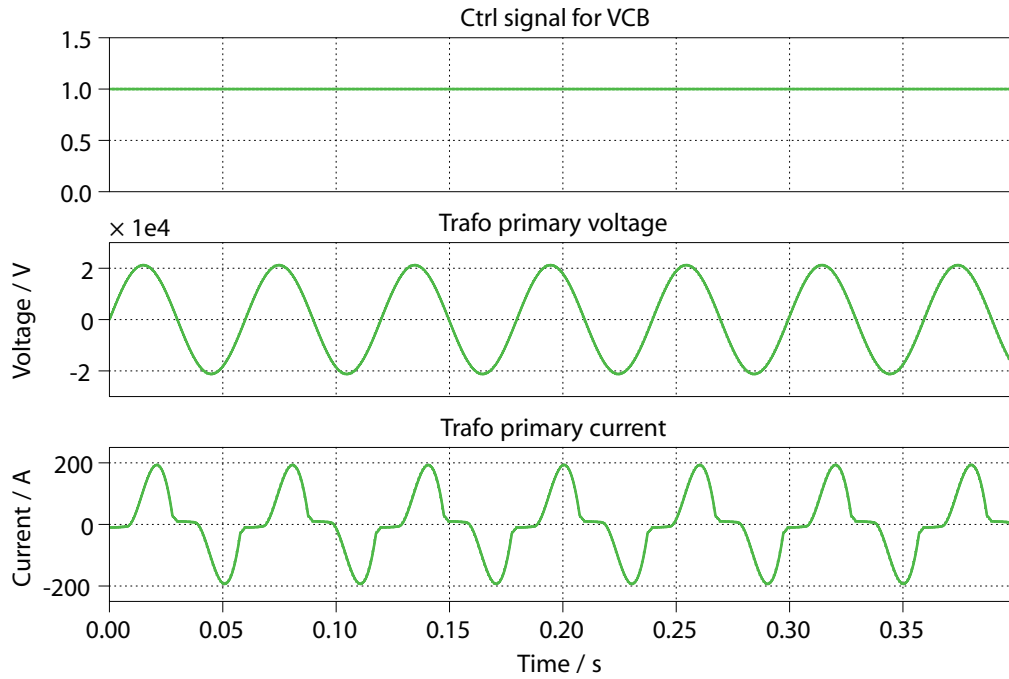
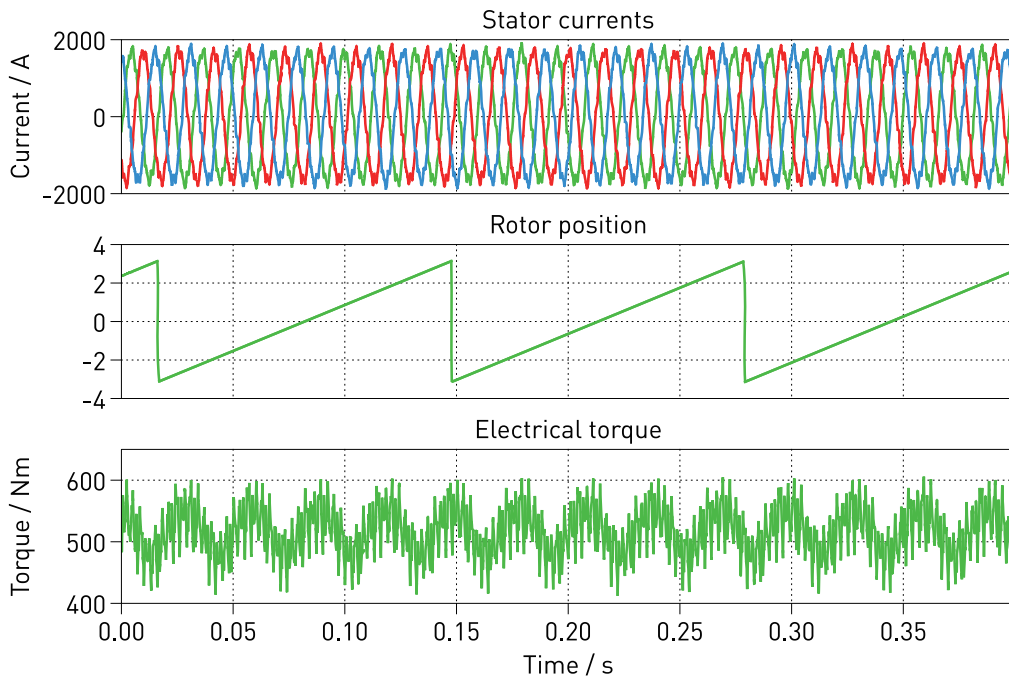


図10: 公称牽引力における1台の牽引モータの波形

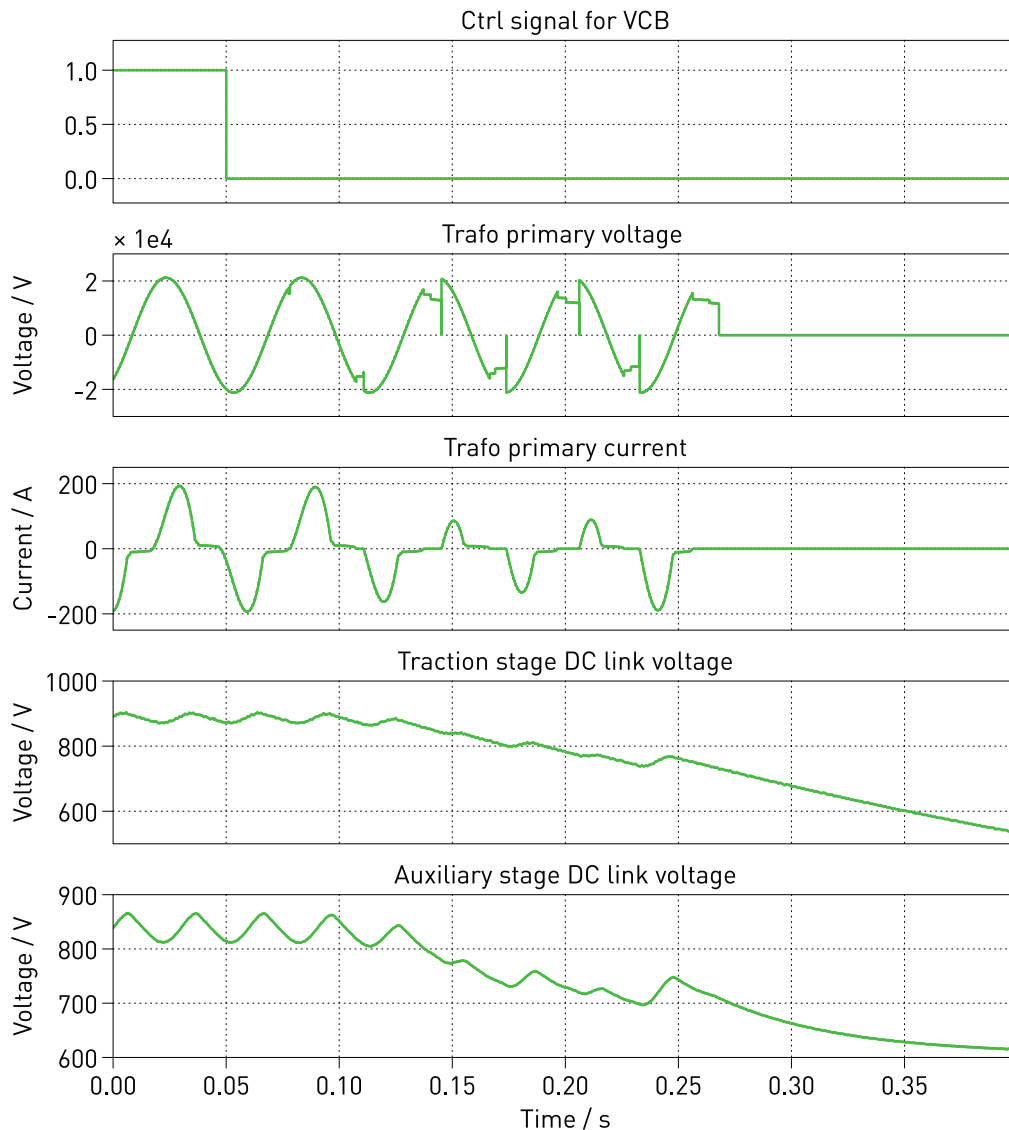


3.3 VCBに電流を遮断する信号を送信

次に、列車が架線上のセクションインシュレータを横切るシナリオを表現します。実際には、送電網からの給電は牽引変圧器から非常に短い時間だけ切断されます。架線のこの一時的な停電中、VCBはアークを消滅させることで、装置の電圧と電流に非線形の乱れを引き起こします。ここではVCBに無効化信号を送信し、VCBのステータスをオンからオフに変更することで、このイベントを表現します。そこで、定数`Ctrl_VCB`を1から0に変更します。これにより、VCBに電流を遮断する信号が送られます。

図11は架線停電の遷移時における変圧器の一次側電圧と電流波形を示す。VCBの消光効果により、電圧と電流の歪みが観測されることがあります。架線の電流が遮断された結果、2つのDCリンク電圧は徐々に低下します(図11を参照)。

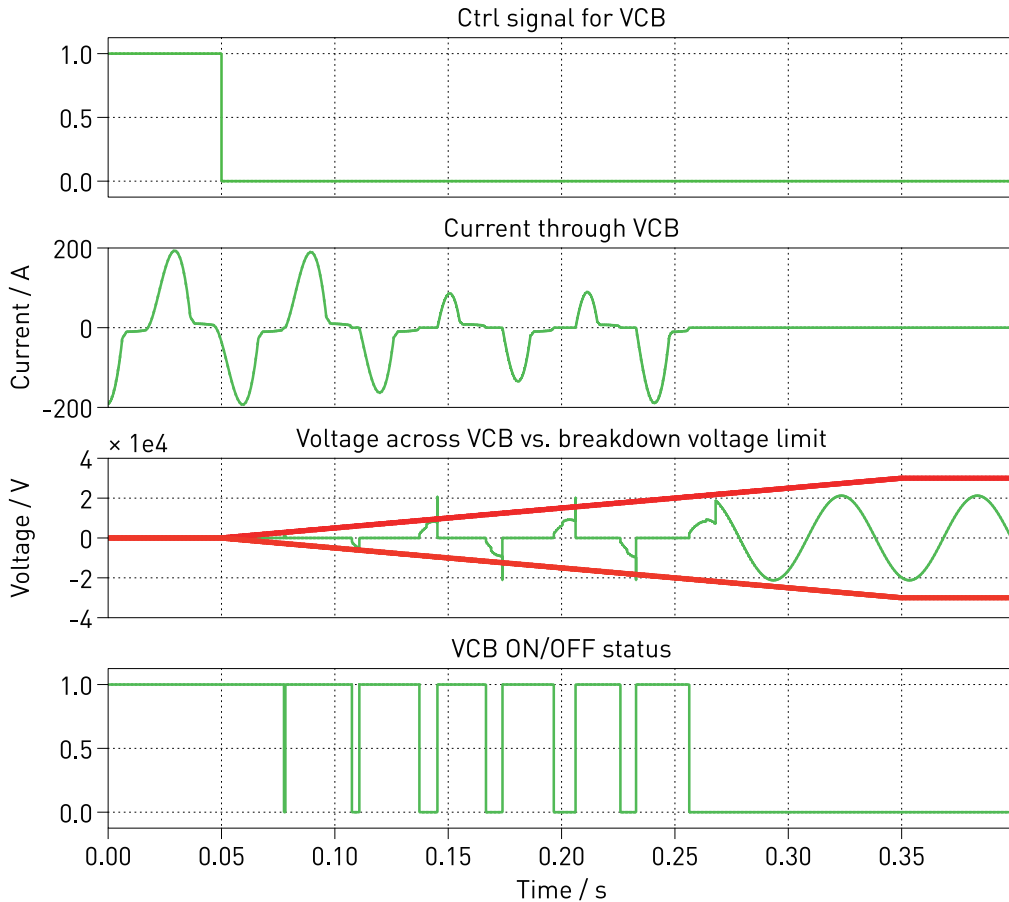
図11: VCBターンオフ遷移中の牽引変圧器一次側の波形とDCリンク波形



その結果、この外乱はDCキャパシタを介してそれぞれのモータおよび補助ステージに伝わります。実際の運用では、補助コンバータとモータ駆動インバータは常に閉ループ方式で制御されます。閉ループ制御は、DCリンク電圧のこの一時的な低下に対処するために用いられます。このようにして、コンバータは負荷に対して要求される電力を供給し続けることができます。この現象はこのデモの焦点ではないため、含まれていません。

図12は、同じ遷移におけるVCBサブシステムモデル内の詳細な波形を示しています。架線への供給電圧が中断されると、電流が0に到達するたびにVCBがアークを消滅させ、耐電圧が増加します。オンとオフの状態を交互に繰り返す数サイクル(約200ミリ秒)があり、最終的に架線の電流は正常に遮断されます。

図12: VCBのターンオフ遷移中のVCB内部の詳細な波形



4 まとめ

このデモモデルは、一般的な鉄道牽引システムを示しています。これは、VCBの電流遮断動作を示しています。デモモデルは、3つのステージに分割された大規模な牽引システムを示しています。各ステージは、RT Box 2または3の3つのコアのいずれかで実行します。

両方のRT Boxの特徴は、3つのCPUコアすべてを使用してマルチタスクモードでシミュレーションを実行することです。各コアの個別のCPU負荷が小さくなるため、平均実行時間が大幅に短縮できます。離散化ステップサイズを小さくすると周波数分解能が向上し、リアルタイムシミュレーションの忠実度が向上します。

5 参考文献

[1] “Open Railway Map”,

[Online]. Available: <https://www.openrailwaymap.org/?lang=null&lat=50.56928286558243&lon=11.151123046874998&zoom=6&style=electrified>. [Accessed: Oct. 26, 2023].

[2] “Vacuum Circuit Breaker”,

[Online]. Available: <https://circuitglobe.com/vacuum-circuitbreaker.html>. [Accessed: Oct. 17, 2023].

改訂履歴:

RT Box TSP 3.0.1 初版



Pleximへの連絡方法:

☎ +41 44 533 51 00 Phone

+41 44 533 51 01 Fax

✉ Plexim GmbH Mail

Technoparkstrasse 1

8005 Zurich

Switzerland

@ info@plexim.com Email

<http://www.plexim.com> Web



アドバンオートメーションへの連絡方法:

☎ +81 3 5282 7047 Phone

+81 3 6285 0250 Fax

✉ ADVAN AUTOMATION CO.,LTD Mail

1-9-5 Uchikanda, Chiyoda-ku

Tokyo, 101-0047

Japan

@ info-advan@adv-auto.co.jp Email

<https://adv-auto.co.jp/> Web

RT Box Demo Model

© 2002–2025 by Plexim GmbH

このマニュアルで記載されているソフトウェアPLECSは、ライセンス契約に基づいて提供されています。ソフトウェアは、ライセンス契約の条件の下でのみ使用またはコピーできます。Plexim GmbHの事前の書面による同意なしに、このマニュアルのいかなる部分も、いかなる形式でもコピーまたは複製することはできません。

PLECSはPlexim GmbHの登録商標です。MATLAB、Simulink、およびSimulink Coderは、The MathWorks, Inc.の登録商標です。その他の製品名またはブランド名は、それぞれの所有者の商標または登録商標です。