



Chain-Free Cycling

自転車向けシリアルハイブリッドドライブ

これまで、ほとんどすべての電動自転車（電動アシスト自転車）では、ペダルと駆動輪との間を機械的に接続したパラレルハイブリッドドライブが搭載されていました。シリアルハイブリッドドライブでは、このような保守に手間のかかる接続は必要ありませんが、走行中に乗り心地が非常に不自然になるのが難点です。IAIのシリアルハイブリッド EE-SpeedBike ではこうした難点が克服されています。dSPACE ツールを使用してスマートな制御方式を実現できたおかげで、非常に自然な乗り心地の電動自転車が実現しました。



ト イツおよび欧州における電動アシスト自転車市場は急速に発展しており、年間成長率は10%近くに達します。今日の中価格帯の電動アシスト自転車は、チェーンドライブやベルトドライブを備えているだけでなく、ペダル付近にミッドドライブモーターやリアハブモーターも搭載しています。これらのドライブコンセプトは、一般にパラレルハイブリッドドライブとして知られています。

シリアルハイブリッドドライブ

既に40年以上の間、多くのエンジニアが自転車向けのシリアルハイブリッドドライブの開発に取り組んできました。このアイデアを着想したのは、1975年にこのコンセプトの特許認定を初めて取得した米国人であるAugustus Kinzel氏です。当時のコンセプトでは、ペダルをジェネレータに直接接続することが想定されていました。この場合、搭乗者のペダルを踏む力によって生まれた電力はケーブルを伝って前輪のモーターに流れ、従来のようにペダルと後輪との間を機械的に接続する必要がなくなりました。しかし、それから数年でシリアルハイブリッドドライブを搭載したさまざまな自転車が多数導入されましたが、乗り心地の不自然さやペダルでの反トルクの欠如など、さまざまな理由で一般には浸透しませんでした。

未来へと続く道

Institut für Automatisierung und Informatik GmbH (Institute for Automation and Computer Science, IAI) がシリアルハイブリッドドライブに関する研究に初めて着手したのは、自転車製造メーカーとの話し合いが発端でした。ここでは、主にさまざまな従来型自転車の性能分析を基に行われてきた研究から、パラレルハイブリッドドライブ式電動アシスト自転車の欠点は特にチェーンと変速機の耐久性と保守性であると考えられました。IAIでは、シリアルハイブリッドドライブを使用して、従来型自転車と同じペダル感覚を維持しながら、少なくともパラレルハイブリッドドライブ式電動アシスト自転車と同等の性能を提供できる自転車の設計に取り組むことにしました。同期ドライブの開発作業は、Federation of Industrial Research Associations (AiF) が資金提供するプロジェクトの一環として開始されました。このプロジェクト

では、最初に関連する計測テクノロジーや制御テクノロジー、パワーエレクトロニクスを商用自転車でテストし、それらを同期ドライブに利用することにより、走行性能を解析しました。モーターやジェネレータで要求されるトルクは、一般的な市販の補助ドライブのトルクとは本質的に異なります。シリアルハイブリッドドライブでは、自転車が必要とするすべての駆動力をドライブモーターで変換して生み出せる必要がある一方で、チェーンドライブに対する適切な反トルクをジェネレータで生み出し、ペダルの踏み具合に応じたフィードバックを搭乗者に提供できなければなりません。しかし、IAIが開発した第1世代のドライブではこれらの要件を完全に満たすことはできませんでした。この場合、トランスミッションを最適化し、小型のサイズに必要なトルクを生み出すという相反する目標を解決するのが唯一の方法でした。それでも、この最初のモデルを開発したことで、ソフトウェアシミュレーションを使用すれば、特殊な制御アルゴリズムによってチェーンドライブのエミュレーションが可能であることが明らかになりました。

X-PESA コンセプト

IAIでは機能的証拠に従い、プラネタリギアを組み込むことによってドライブを小型化し、トルクを増大させることに成功しました。これにより、特別設計のフレーム内にコンセプト全体を収めることが可能になりました。こうして、より機能的なモデルとして誕生したX-PESAは、時速25kmの電動アシスト自転車として設計され、現行のパラレルハイブリッドドライブ式電動アシスト自転車に匹敵する性能を実現しました。ただし、開発の初期段階では、ジェネレータが重くかつ大き過ぎたため、1段プラネタリギアでは求められるトルクを実現できないことは明らかでした。

次世代モデル

IAIでは、国家戦略であるELISA (Electric Mobility and Lightweight Engineering) の一環としてザクセンアンハルト州から資金提供を受けることにより、ドライブの開発を再開することになりました。現在、ジェネレータは2段プラネタリギアに搭載されており、総重量2.9kgで最大180Nmのトルクを生み出すため、体重100kgの搭乗者が積極的にペダルを踏んでいる間でも十分な反トルクを感じ

>>

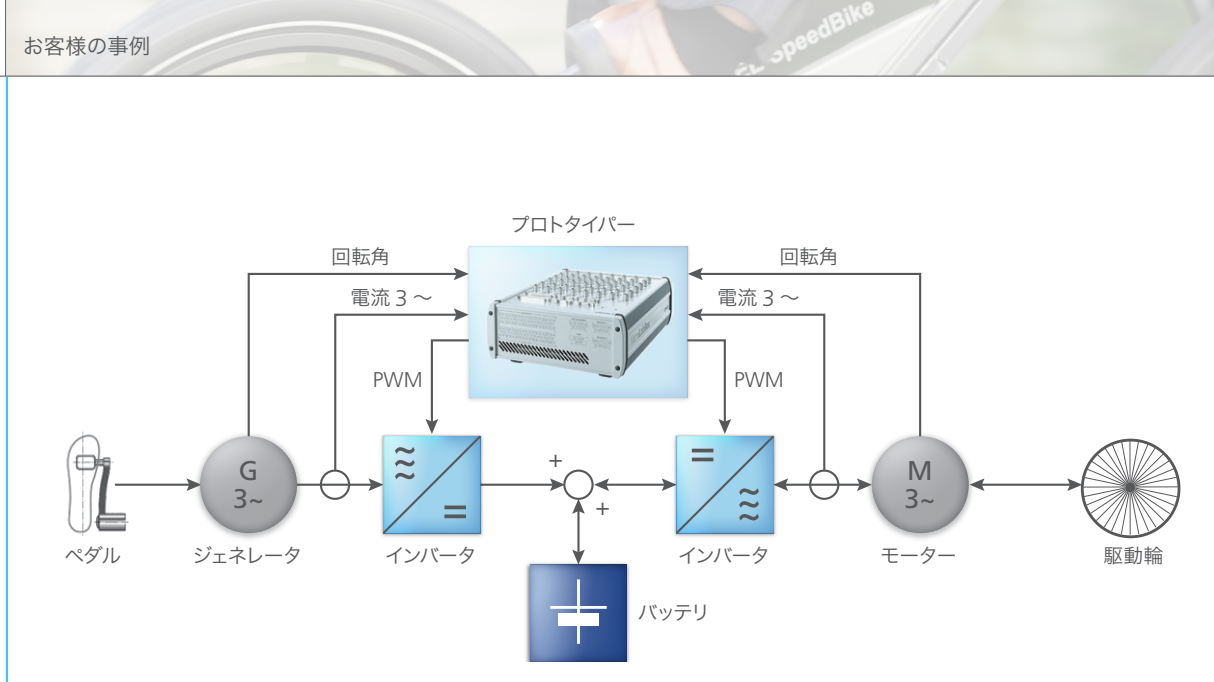


図1：dSPACE MicroLabBox をプロトタイパーとして使用したシリアルハイブリッドドライブの電力フロー

ることができます。リアスプロケットの設置スペースを利用したドライブモーターは、トルクがピーク時で 120 Nm に達し、瞬間的に 2 kW の電力を発電します。そのため、モーターは最大時速 45 km の S-Pedelec カテゴリで使用できるよう設計されています。また、時速 25 km の速度制限が適用されるあらゆる種類のバイク（シティバイク、マウンテンバイク、カーゴバイク、三輪自動車など）で利用することもできます。モーターおよびジェネレータは、完全にメンテナンスフリーです。エネルギーの変換工程が二重であるにも関わらず、ペダルと後輪との間の機械的な接続や機械回路が存在しないため、このドライブシステムの効率性とコストは原理的にはパラレルハイブリッドドライブに匹敵します。また、シリアルハイブリッドドライブの優れた機能性は他に類を見ません。

スマートフォンで容易に制御

ドライブトレインの中心部には 16 ビットのマイクロコントローラが搭載されており、モーターおよびジェネレータのリアルタイム制御や各種のモニタリングタスクを実行しています。さらに、Bluetooth で接続されたスマートフォンや制御ディスプレイとの通信処理も行います。また、スマートフォンの画面には特別開発のアプリによって速度、バッテリーレベル、性能などのあらゆる運転パラメータが表示されます。スマートフォンではさまざまな運転モードの設定も行えます。手動切り替えモードでは、制御ディスプレイを使用して従来の変速機に相当する 20 段変速ギアを仮想的に操作できます。シリアルハイブリッドドライブでは、代替オプションとして連続自動式変速機が備えられており、搭乗者は制御ディスプレイから希望するストライドレートを設

定することができます。バッテリーによる走行サポート機能では、搭乗者に適した電気的な「追い風」を変数設定によって調整できます。中間サポートを選択すると、EE-SpeedBike で 80 km までの距離を走行できるようバッテリーパックが設定されます。距離は任意に延長可能です。搭乗者がドライブトレインで必要となる以上の力でペダルを踏んで走行した場合、発生した余剰電力はバッテリーに充電されます。たとえば、時速 45 km では駆動力の多くはバッテリーパックから提供されることとなりますが、それでも走行可能な距離は 45 km です。また、エクササイズバイクモードを使用すると、バッテリーを電源ソケットに接続して充電するように、静止している自転車のペダルを踏んで 850 Wh バッテリーに充電することができます。後輪の制動時には、継続的に制御可能な回生モードでモーターが動作し、運動エネルギーを電気エネルギーへと変換し、機械式ブレーキがかかっている間にバッテリーへの給電を行います。

図2：Bluetooth を介して接続したスマートフォンのユーザインターフェース



最初の試運転

ドライブコンポーネントの試運転および評価は、DS1103 PPC Controller Board を使用して行われました。ここでは、DS1103 の優れた性能により、MATLAB®/Simulink® で開発された CPU 負荷の高い制御アルゴリズムの場合でも、最初にランタイムの最適化を検討することなくリアルタイムでテストすることができました。また、DS1103 の拡張補助機能を使用することにより、テストベンチ上でモーターやジェネレータの総合的な試験走行を実施することもできました。

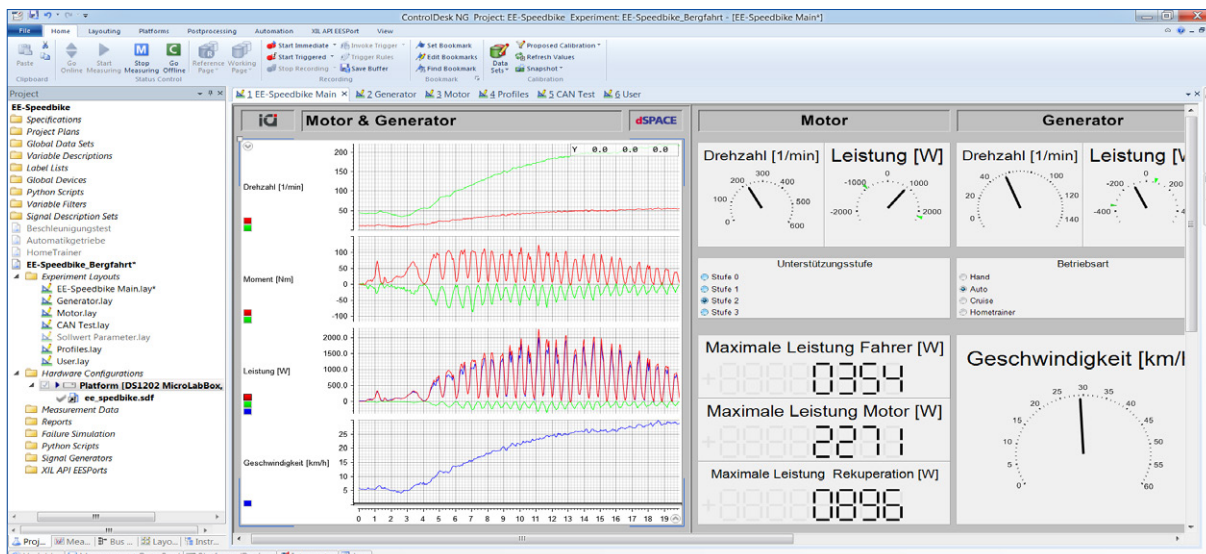


図3：テストベンチでの山岳走行シミュレーションにおいてモーターおよびジェネレータから発生したトルク、回転速度、およびさまざまなレベルの電力

「dSPACE MicroLabBox の広範囲な I/O ファンクションのおかげで、当社は新しいドライブコンセプトをテストベンチで極めて柔軟にテストすることができました」

Steffen Braune 氏、Institut für Automatisierung und Informatik GmbH (IAI)

DS1103 から MicroLabBox へ

近年、IAI ではテストベンチでの MicroLabBox の使用を開始しています。テストベンチで MicroLabBox を使用すると、特にマルチチャンネル PWM 信号生成において、DS1103 および拡張補助機能を使用するよりも高い演算処理能力を実現することができるため、モーターとジェネレータの同時テストが可能になります。これにより、研究者は2つのドライブの相互作用に対する理解をより深めることができ、ジェネレータに関係する乗り心地とモーターのトルク生成の両方を継続的に改善することができました。また、RTI USB Flight Recorder Blockset を使用することにより、長期間にわたり関連するすべてのプロセスデータを高いサンプリングレートで記録できるようになったため、解析作業ははるかに容易になりました。さらに、ControlDesk 5.5 の拡張機能である新たな Variable Browser や個別のプロッタを新しい計測値として保存する機能などを活用することで、テストシリーズを迅速かつ効率的に実装および評価できるようになりました。

まとめと今後の展望

EE-SpeedBike およびその先行モデルである X-PESA は、合わせて数千キロメートルもの路上およびテストベンチでのテストを行い、目立った問題は一切ありません

でした。2015年12月には、ザクセンアンハルト州のフーゴーユンカーズ研究開発賞における「応用研究で最も革新的なプロジェクト」のカテゴリで、このドライブコンセプトが第3位という栄誉を受けました。IAI では、次の開発ステップとして、現在のモデルの産業化を図り、量産テクノロジーを通じて多数の自転車を製造することを目指しています。■

Steffen Braune 氏、Knut Hahne 氏、Institut für Automatisierung und Informatik GmbH (IAI)

Steffen Braune 氏

メカトロニクスシステム部門プロジェクトリーダー、Institut für Automatisierung und Informatik GmbH (IAI) (ドイツ、ヴェルニグローデ)



Knut Hahne 氏

アプリケーションエンジニア、Institut für Automatisierung und Informatik GmbH (IAI) (ドイツ、ヴェルニグローデ)

