

DORAEMON「タップ & チャージ」システム提案の強化

原文全文 (Markdown)

DORAEMON「タップ&チャージ」システム提案の強化

序論とコンセプト概要

DORAEMON (Detached On-demand Rapid Absorption Energy Mechanism for Optimized Networks: 最適化ネ

このアイデアを確かなものにするには、以下を包含する厳密な理論枠組みが必要です。

- 短時間パルス中の高効率な電磁結合（短時間接触で高い電力をどう達成するか）
- 中間貯蔵（スーパーキャパシタ）の高速吸収ダイナミクス（容量、ESR、リーク等の回路物理による限界）
- バッテリーへの最適放電制御（充電速度と寿命の両立）

以下では各要素を数理的に詳細化し、理論主張が物理的に妥当であることを示します。さらに、MATLAB/S

瞬時エネルギー移送のための電磁結合理論

相互インダクタンスと共振結合

送電・受電の2つの共振コイルは、結合した誘導システムを形成します。相互インダクタンス M は、

\$\$

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{C_1} \oint_{C_2} \frac{d\vec{ell}_1 \cdot d\vec{ell}_2}{|\vec{r}_{12}|^3}$$

\$\$

幾何形状によっては数値計算が必要ですが、コイル間距離が小さいほど、また重なり面積が大きいほど M

共振動作では、各コイルにコンデンサ (C_1, C_2) を直並列に組み合わせ、 $\omega_0 = 2\pi f_0$

伝送効率と最適負荷

等価回路モデルでは、 R_1, R_2 を各コイルの損失、 R_L を負荷抵抗（整流・蓄電側で見込む有効

\$\$

$$\eta_{\max} = \frac{k^2 Q_1 Q_2}{\bigl(1 + \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2}\bigr)^2},$$

\$\$

例えば $k^2 Q_1 Q_2 \approx 0.42^2 \times 200 \times 150 \approx 5290$ とすると $\eta_{\max} \approx$

なお、最大電力点と最大効率点は一般に一致しません。短時間での総捕獲エネルギーを最大化するには、

50 ms 窓を満たす応答性

6.78 MHz で 50 ms は約 34 万サイクルに相当し、定常移送には十分な周期数です。立上りは τ

アライメントの誤差は k を低下させ、効率を損ねます。短時間ではフィードバックで補正できないた

スーパーキャパシタ群による高速吸収

充電ダイナミクスとエネルギー式

短時間パルスで受けたエネルギーは、まずスーパーキャパシタ (SC) 群に取り込まれます。バッテリーは

有効容量 $C_{\text{eff}}(V_c)$ と ESR R_{ESR} を用いると、

- 電荷収支： $\frac{dV_c}{dt} = \frac{I_{\text{in}} - I_{\text{leak}}}{C_{\text{eff}}(V_c)}$
- 蓄積エネルギー： $E(V_c) = \int_0^{V_c} C_{\text{eff}}(V) V dV$
- 入力電力の内訳： $P_{\text{in}} = P_{\text{stored}} + P_{\text{loss}} + P_{\text{leak}}$

短時間 (50 ms) ではリークは無視でき、支配的損失は ESR です。瞬時蓄積効率は

\$\$

$$\eta_{\text{stor}}(I) = \frac{V_c I}{V_c I + I^2 R_{\text{ESR}}} = \frac{1}{1 + \frac{I R_{\text{ESR}}}{V_c}}$$

\$\$

従って、 V_c が小さい初期に大電流を流すと $(I^2 R)$ 損失が卓越し非効率です。低 ESR の素子を選

最大捕獲のための最適電流波形

目的は (T_c) 内に $(E(V_c(T_c)))$ を最大化すること。制約は $(0 \leq I(t) \leq I_{\text{max}})$ 、電圧・

熱は単発パルスでは大きく上がらず、累積で管理すれば十分です。

最適放電とバッテリー充電理論

SC に貯えたエネルギーは、分離後にバッテリーへ数十分かけて移されます (2段階充電: 50 ms で SC 充

\$\$

$$V_{\text{bat}}(t) = \text{OCV}(\text{SOC}) + I_{\text{bat}}(t) R_{\text{int}} + V_{\text{RC}}(\tau_{\text{RC}}) \dot{V}_{\text{RC}} + V_{\text{RC}} = I_{\text{bat}} R_{\text{RC}}.$$

\$\$

実務的には CC-CV (定電流→定電圧) が最適制御の解と整合し、温度制約に達するまで最大許容電流で充電

コードによる検証フレームワーク

- 電磁結合：幾何・位置ズレ・距離・周波数に対する κ と効率を FEM (COMSOL、Maxwell) または相
- SC 充電： $V_c(t)$ の ODE を ESR 損失込みで数値積分し、定電流 vs テーパ電流の効率を比較。最
- バッテリー放電：SC 初期電圧から DC-DC を介して CC-CV 充電を模擬し、SOC 上昇と温度を評価。
- システム統合：相互インダクタ+整流+DC/DC+熱のコシミュレーションでエッジケースを検査。

実現性と推奨

- 高性能部品：高 Q コイル（リッツ線等）と低 ESR SC（ミリオーム級）で η
- 安全と規制：6.78 MHz・100 W 級でも近接強結合とシールドで放射を抑え、近接検知・インタロックを
- アライメント補助：ガイドや磁気吸着で再現性を確保。
- スケール感：スマホ・ウェアラブル等の中小電力で即効性が高い。EV 等の大容量は増パワーや複数タッ
- 段/並列構成：並列受電→直列放電などの構成切替で電圧レベル最適化（要安全設計）。
- 適応制御：可変マッチング（バラクタ等）や学習で波形・同調を最適化。
- 多目的最適化：時間・効率・寿命の優先度に応じてモード切替（ブースト/エコ）。

結論として、DORAEMON のタップ&チャージは厳密な理論・数値検証に照らして実現可能です。高周波共振

参考文献 (Sources)

- Kurs, A. ほか, “Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances,” *Science*.
- Wang, X. ほか, “Time-varying systems to improve the efficiency of wireless power transfer,” *
- Volfpack Energy Blog, “Wireless Charging with Supercapacitors – The Future of Fast, Convenient
- ABB Press Release, “ABB demonstrates flash charging electric bus in 15 seconds,” 2013年6月3日
- Park, S. ほか, “Optimal Control of Battery Fast Charging Based on Pontryagin’s Minimum Princi