

プラント設備の電磁ノイズ抑制技術

Electromagnetic Noise Suppression Technologies for Plant Equipment

長谷川 光平 HASEGAWA Kohei 小林 伸次 KOBAYASHI Shinji 高松 誠昇 TAKAMATSU Seisho

上下水道システムなどのプラント設備の新設・更新工事では、稼働停止期間が短いことが求められる。しかし、プラント設備は大電力を扱うため、電磁ノイズによるセンサー装置類の誤動作・誤検出が発生しやすく、稼働開始までに時間が掛かる場合がある。

東芝は、設計式に基づいて磁気飽和を抑えるノイズ抑制回路の設計手法と、周波数特性に着目したモデルを用いて電磁ノイズを予測するシミュレーション環境を開発した。これらにより、プラント設備の電磁ノイズを工事前に予測して抑制し、電磁ノイズによる誤動作・誤検出を防ぐことで、稼働停止期間の短縮を可能にした。

In the construction or renewal of facilities such as water supply and sewage treatment plants, the shortest possible period of downtime is generally required. However, because the equipment in such plants handles large amounts of power, electromagnetic noise can easily cause sensor devices to malfunction or falsely detect errors, prolonging the time required to start operation.

Toshiba has developed a design method for noise suppression circuits that suppresses magnetic saturation based on design formulas, and a simulation environment to predict electromagnetic noise using a model focusing on frequency characteristics. These technologies make it possible to predict and suppress electromagnetic noise in plant equipment before construction begins, thereby preventing malfunctions and false detections caused by electromagnetic noise and shortening downtime.

1. まえがき

様々な装置から構成されるプラント設備では、新設や更新の工事期間を遵守するために、稼働停止期間は短いことが望ましい。しかし例えば、工事後の試運転でプラント設備のセンサー装置類で予期しない誤動作・誤検出が発生すると、その要因究明と改善が必要になり、稼働開始までに時間が掛かる。誤動作・誤検出の要因の一つとして、プラント設備のパワーエレクトロニクス(以下、パワエレと略記)装置類は大電力を扱うため、電磁ノイズが発生しやすいことが挙げられる。この電磁ノイズが、微小な電力を扱うセンサー装置類の誤動作・誤検出につながる。

これを防ぐために、各装置には、電磁ノイズの規格に合格したものを使用する。しかし、規格は特定の条件で評価した結果で合否を判定するため、納入先ごとに仕様の異なるプラント設備でも同様の結果になるとは限らない。つまり、プラント設備に初めて電源を投入したときに、電磁ノイズによる問題が顕在化する。

そこで、ノイズ抑制回路の設計手法と、プラント設備の電磁ノイズを予測するための回路シミュレーション環境を開発した。ノイズ抑制回路は、パワエレ装置類の組み合わせ条件によってノイズ抑制の効果が失われることがあるが、これ

を防ぐ設計手法を確立した。回路シミュレーション環境については、装置単体の電磁ノイズを評価する事例⁽¹⁾が、これまでも多く報告されている。これに対して、開発した回路シミュレーション環境の特長は、複数の装置からなるプラント設備の電磁ノイズを、任意の条件で評価できることである。また、ノイズ抑制回路の効果も、評価可能である。

ここでは、上下水道システム向けのプラント設備を例に、開発した技術の概要について述べる。

2. プラント設備の電磁ノイズ抑制

図1に、上下水道プラント設備の構成例を示す。ポンプを動作させるためのパワエレ装置類は、電源・インバーター盤・ポンプにつながるモーターとそれらを接続するための電力ケーブルで構成する。電磁ノイズの発生源は、インバーター盤に内蔵したPWM (Pulse Width Modulation) 方式のインバーター回路である。この回路に搭載するパワーデバイスがスイッチング動作することで電磁ノイズが発生する。電磁ノイズの影響を受けるセンサー装置類はインバーター回路から離して配置する。発生した電磁ノイズは、電力ケーブルに限らずインバーター盤の筐体(きょうたい)や地面など、様々な構造物を介してセンサー装置類に伝わり、センサー装置類の耐電磁ノイズの限界を超えると誤動作な

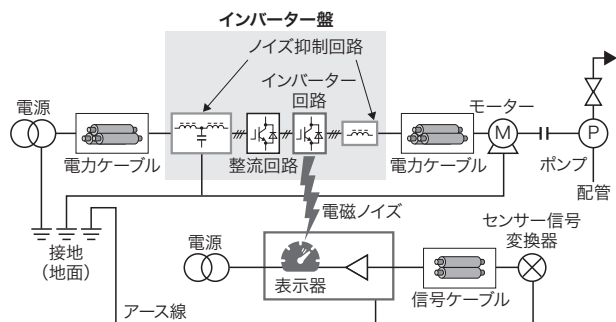


図1. 上下水道プラント設備の構成例

ポンプを駆動するためのインバーター回路で生じた電磁ノイズが、センサー装置類に影響して、誤動作・誤検出が発生する。

Example of configuration of water supply and sewage treatment plant equipment

どの問題が顕在化する。

2.1 ノイズ抑制回路の設計手法

センサー装置類に伝わる電磁ノイズの抑制方法には、次の3通りがある。①インバーター回路で生じる電磁ノイズを小さくする、②インバーター盤の外に電磁ノイズを漏らさないようにする、③漏れた電磁ノイズが伝わる経路を断つ。様々な制約条件の中で、プラント設備を設計する段階で適用可能な方法は②である。

これを実現するために、インバーター回路にノイズ抑制回路を接続する。一般的なノイズ抑制回路は、規格で定められた評価方法で性能を発揮するように設計されている。そのため、実際に接続する装置のインピーダンスが評価用のインピーダンスと異なると、ノイズ抑制回路は効果を十分に発揮しない。特に、無数に存在する装置の組み合わせの中から不適切な組み合わせを選択した場合、ノイズ抑制回路を構成する部品そのものの性能が失われることもある。

この具体例がノイズ抑制回路を構成するコイル部品の磁気飽和であり、インバーター回路の動作中に断続的に電磁ノイズの抑制効果が失われる挙動を引き起こす。そこで、磁気飽和を発生させない条件を明らかにして、設計式を使ったノイズ抑制回路の設計手法を確立した⁽²⁾。

図2に、磁気飽和の要因を明確にするために用いた等価回路を示す。これは図1で示したインバーター盤や、それにつながる電力ケーブル、モーターの構成を簡素化したものである。 L_{CMC} は評価対象のコイル部品のインダクタンス、 L は L_{CMC} と配線などで生じるインダクタンス L_{ext} の和、 C はモーターや電力ケーブルの対地容量などによるキャパシタンス、 R は接地や配線による抵抗である。この回路を解析すると、評価対象のコイル部品の両端に掛かる電圧 V_{CMC} を、スイッチングする電圧 V_A で割って規格化した電圧(規格化電

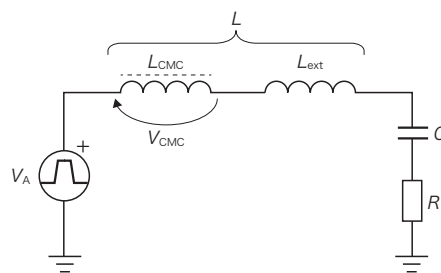


図2. 解析のための等価回路

複雑なインバーター装置類の構成を単純な等価回路に変換して、コイル部品に発生する電圧を解析する。

Equivalent circuit for analysis

圧) u_{CMC} に関する設計式(1)と(2)が導出できる。式(1)はパワーデバイスのスイッチング周波数で発生する規格化電圧、式(2)は部品が磁気飽和しない限界の規格化電圧を意味する。

$$|u_{CMC}| = \frac{\omega L}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2 \left(1 - \frac{1}{\omega^2 LC}\right)^2}} \frac{L_{CMC}}{L} \quad (1)$$

$$|u_{CMC}| < \frac{\pi^2 N_t A_c B_{MAX}}{V_A} f N_h \quad (2)$$

ここで、 f はパワーデバイスのスイッチング周波数、 ω は角周波数($=2\pi f$)、 N_t はコイル部品の巻数、 A_c はコイル部品に使用する鉄心材料の断面積、 B_{MAX} は鉄心材料にかけることのできる最大磁束密度、 N_h は評価したいスイッチング周波数の次数を表す(基本周波数は $N_h=1$)。式(1)が式(2)を満たせば磁気飽和は発生しない。

図3に、横軸に周波数、縦軸に規格化電圧を取って式(1)・(2)をプロットした例を示す。 fN_h で求まる周波数の点において、式(1)の実線が式(2)の一点鎖線で示した限界電圧を上回っていると、磁気飽和が発生すると判定できる。仮に磁気飽和する領域で使用することが明らかになった場合は、設計式から、次のような回避方法が考えられる。

- (1) 使用するモーターの仕様や電力ケーブルの種類・長さを変えて、 L と C のバランスを変える
- (2) インバーター回路のスイッチング周波数を変更する
- (3) インバーター回路で発生する電圧を下げる
- (4) コイル部品で使用する鉄心を変更するなどの設計を変更する

ノイズ抑制回路の設計段階では、(4)が変更しやすい。また、仮にプラント設備の試運転の段階で同じ現象が発生した場合は、(2)による回避もできる。状況に応じて、最も実施

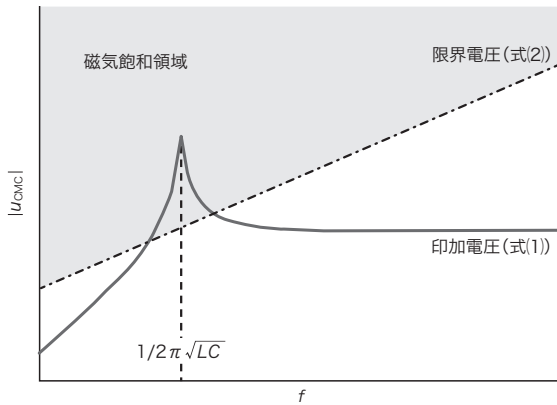


図3. 磁気飽和発生の評価

設計パラメータを決定すると、磁気飽和の発生を判定できる。

Estimation of occurrence of magnetic saturation

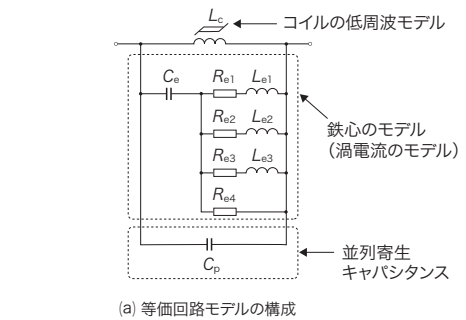
しやすい方法で磁気飽和が発生しないノイズ抑制回路を設計した後、2.2節で述べる回路シミュレーションを活用して、所望の設計ができたことを確認する。

2.2 回路シミュレーション環境

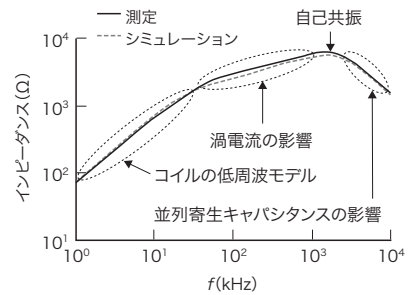
電磁ノイズの回路シミュレーションでは、寄生素子と呼ばれる回路図に記載されない電気的な要素を考慮することが重要である。寄生素子の具体例として、長いケーブルがインダクターやキャパシターのように動作したり、金属の筐体と配線の間にキャパシタンス成分が生じて電流の経路となったりすることが挙げられる。寄生素子の値や等価回路モデルの回路構成を適切に見積もるために、まず、使用する各装置のインピーダンスの周波数特性を、実測や電磁界シミュレーションで取得する。次に、取得したインピーダンスの周波数特性に基づいて、等価回路モデルを作成する。等価回路モデルで再現すべき周波数帯域はシミュレーションの目的により様々であるが、今回はプラント設備の使用手法や物理的な大きさ、ノイズの規格を考慮して、商用周波数付近からMHz帯までを再現することとした。

図4にノイズ抑制回路で使用するコイル部品のモデル化の例と結果を示す。図4(a)は等価回路モデルの構成を表す。鉄心材料の周波数特性や巻線間で生じる寄生キャパシタンスを考慮して、 L 、 C 、 R の各素子の接続方法と値を決定し、部品の特性を再現した。図4(b)にコイル部品のインピーダンス測定結果とシミュレーション結果を示す。シミュレーション結果が測定結果とよく一致していることから、等価回路モデルが適切であるといえる。低周波域のコイルの特性や、周波数が高くなって発生する渦電流や寄生キャパシタンスの影響で発生するインピーダンスの傾きの変化を再現できている。

このような部品に限らず、プラント設備を構成する各装置



(a) 等価回路モデルの構成



(b) インピーダンス-周波数特性

L_c : コイルのインダクタンス C_e : 鉄心のキャパシタンス $R_{e1} \sim R_{e4}$: 鉄心の抵抗
 $L_{e1} \sim L_{e3}$: 鉄心のインダクタンス C_p : 並列寄生キャパシタンス

図4. 電磁ノイズのシミュレーション等価回路の例

寄生素子を考慮した等価回路モデルとすることで、広い周波数帯域で模擬できる。

Example of equivalent circuit for noise simulation

や、構造物の等価回路モデルを作成してつなぎ合わせることで、最終的にプラント設備の装置構成と1対1で対応した等価回路モデルを完成させた。更に、インバーター回路のスイッチングパターンを表現したノイズ源のモデルを作成して、最終的な等価回路モデルに接続することで、任意の観測点で生じる電磁ノイズを再現した。これにより、プラント設備で発生する電磁ノイズを事前に評価できる回路シミュレーション環境を構築した。今回構築した回路シミュレーション環境では、ケーブルの種類・長さやインバーター盤の構成などの様々な設置条件、及びインバーター回路のスイッチングパターンを任意に変更できるようにした。これにより、プラント設備の設計者が、仕様に適した装置の組み合わせを検討できる。更に、2.1節で述べた磁気飽和現象も部品の等価回路モデルに組み込むことで、ノイズ抑制回路の効果だけでなく磁気飽和せずに動作するかどうかを確認できるようにした。

2.3 模擬プラント設備による検証

ノイズ抑制回路の設計手法の妥当性や回路シミュレーション環境の精度を検証するために、実際の上下水道システムに近い構成の模擬プラント設備を製作して実験した(図5)。ケーブルの種類・長さ、及びインバーター回路の動作など

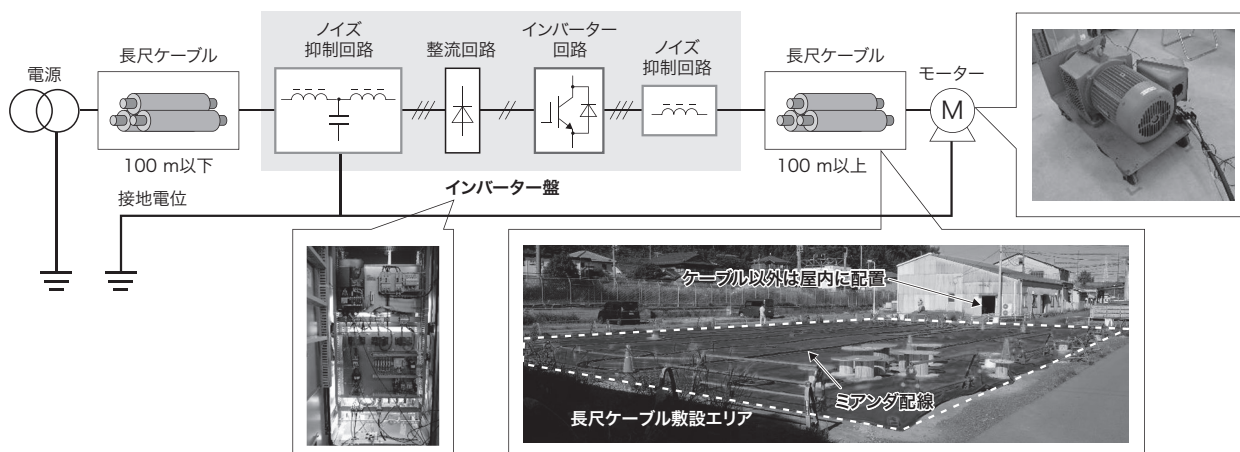


図5. 実機評価環境

上下水道システムを模擬した実験機を製作して、ノイズ抑制回路の設計手法の妥当性や回路シミュレーション環境の精度を評価した。

Experimental environment

を変えながら電磁ノイズを評価した結果、2.1節で示した設計手法が適切であることや、2.2節の回路シミュレーション環境で得た電磁ノイズの周波数特性が実機と整合することを確認した。

このように、今回開発したノイズ抑制回路の設計手法や、回路シミュレーション環境により、事前に電磁ノイズを評価して抑制することが可能になった。

3. あとがき

プラント設備の新設・更新工事の後に、予期しない電磁ノイズにより稼働開始までに時間が掛かり、計画が遅れることを防ぐために、ノイズ抑制回路の設計手法と、電磁ノイズを予測するための回路シミュレーション環境を開発した。ノイズ抑制回路では、設計式を導出して磁気飽和を発生させない条件を明らかにした。回路シミュレーション環境は、寄生素子を考慮した各装置の等価回路モデルをつなぎ合わせて構築した。これにより、各装置の条件を変更することで、任意の仕様のプラント設備で生じる電磁ノイズを予測できるようになった。

今後、この技術の高度化を進めて、プラント設備の設計業務の効率化や、工事現場で発生する電磁ノイズ問題のゼロ化による工期短縮を目指すとともに、東芝グループの他製品への技術展開を図っていく。

文献

- (1) Koyama, Y. et al. Modeling and Analysis for Simulation of Common-Mode Noise Produced by an Inverter-Driven Air Conditioner. IEEE Transactions on Industry Applications. 2011, 47, 5, p.2166-2174.

- (2) Hasegawa, K. et al. Magnetic Saturation Suppression of Common-Mode Choke Coil by Selecting Suitable Inverter Carrier Frequency. IEEJ Journal of Industry Applications. 2022, 11, 6, p.845-851.



長谷川 光平 HASEGAWA Kohei
生産技術センター
電子機器・実装・制御技術領域 制御技術研究部
電気学会・電子情報通信学会・IEEE 会員
Electronics Control Technology Research Dept.



小林 伸次 KOBAYASHI Shinji
東芝インフラシステムズ (株)
インフラシステム技術開発センター システム制御・ネットワーク開発部 応用物理学会会員
Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.



高松 誠昇 TAKAMATSU Seisho
東芝インフラシステムズ (株)
社会システム事業部 水・環境システム技術第二部
電気学会・環境システム計測制御学会・電気設備学会会員
Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.