

電鉄用変電所が発生する電磁界解析と低減対策

電力技術研究部 き電
研究員 森田 岳

1. はじめに

近年、電力設備が発生する低周波の電磁界に関連する電磁環境問題は、国内、国外を問わず大きな関心事となっている¹⁾。国内においては平成19年度に経済産業省・電力安全小委員会において実施されたワーキンググループにおいて、国際非電離放射線防護委員会（ICNIRP）のガイドライン^{2),3)}に基づく磁界規制の導入、長期的影響に対する科学的不確実性を低減させるための研究の推進、利害関係者や専門家間でのリスクコミュニケーション活動の推進、新規設備における低費用の暴露低減対策の導入、などが政策提言として提案された¹⁾。鉄道に対しても、鉄道設備が発生する低周波磁界に対する測定規格として、ヨーロッパ規格 EN 50500⁴⁾が発行されるなど重要な検討課題となっている。

本報告では、電気鉄道用の変電所を対象として、これが発生する低周波（直流～数百 Hz 程度）の電磁界（電界および磁界）の物理的特性、計算手法について述べる。そして、この計算手法を用いた磁界の低減対策と、それを踏まえた変電所の設計例を紹介する。

2. 変電所が発生する電磁界の特性

本報告では電界の表現として電界の強さ (V/m) を、磁界の表現として磁束密度 (T) をそれぞれ用い、以下では両者を特に区別無く使用する。

2.1 電界の特性

低周波電界は電圧に関係する場であり、加圧物（静電遮へいされていないもの）の周囲に発生する。変電所における主たる発生源は裸電線路（シールド層を有しない絶縁電線も含む）であり、機器や盤は接地された外箱によって静電遮へいされるため、外部には電界を発生させない。

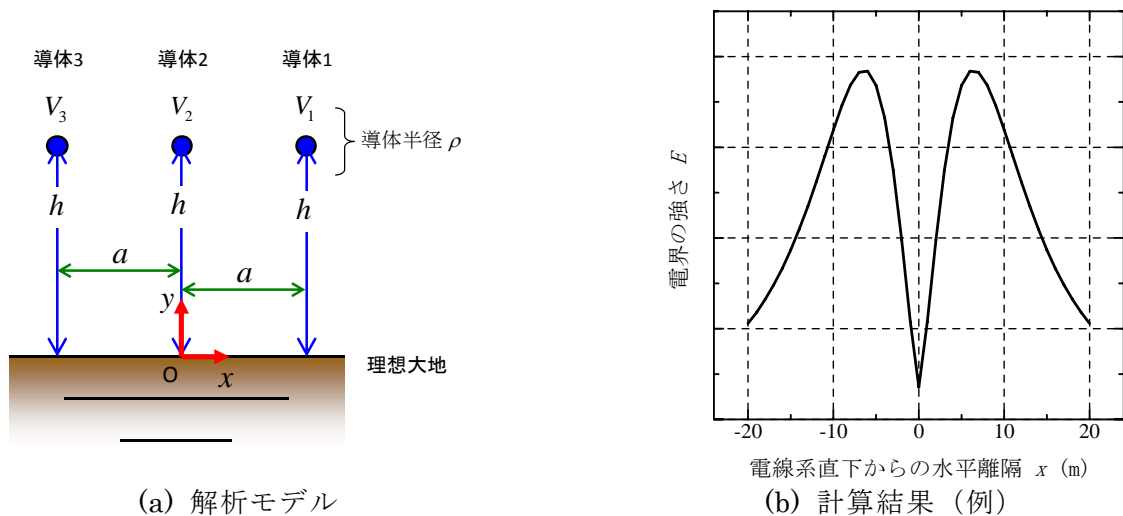


図 1 三相架空電線路の発生する電界の計算

電界は水分や金属物の存在などにより容易に擾乱を受ける性質があり、正確な計算は一般に困

難であるが、オーダーや傾向の把握においては近似計算で十分なことが多く、通常は電位係数と Coulomb の法則によって計算が行われる。二線や三線（図 1 (a)）の簡単な電線路に対しては、簡易計算式を導くことが出来る。例えば、同図(a)のモデルで大地表面での電界 E は、

$$E(x) = -2 \left[\frac{1}{\ln(2^{7/3} h^3 / \rho a^2)} \frac{h}{x^2 + h^2} (V_1 + V_2 + V_3) + \frac{1}{\ln(2^{1/3} a / \rho)} \frac{2ahx}{(x^2 + h^2)^2} (V_1 - V_3) \right] \quad (1)$$

ただし、近似成立条件は、 $\rho \ll a$, $a \ll h$

となり、電線路の直下からの水平離隔 x の二乗に反比例して減衰する項と、三乗に反比例して減衰する項の和となる。三相交流における計算結果例（結果は実効値で表示）を図 1 (b)に示す。

2.2 磁界の特性

磁界は電流に関係する場であり通電導体の周囲に発生する。変電所において磁界の発生源となるものは、電線、電気機器などが挙げられる。電線については、Biot-Savart の法則を用いて発生する磁界を計算することができるが、三相の送配電線についてより実用的な簡易計算式が導かれている^{5),6)}。電気鉄道にも適用できる形式で、同様の解析式を導出することが可能である。図 2 に示す電線路の中心から離隔 r の点 P に発生する磁界 B は、真空の透磁率を μ_0 として、

$$B(r) = \frac{\mu_0}{2\pi r^2} \sqrt{a_x^2 \left[\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^m (l-1) I_{k,l} \right]^2 + a_y^2 \left[\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^m (k-1) I_{k,l} \right]^2} \quad (2)$$

ただし、 $\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^m I_{k,l} = 0$ 、かつ近似成立条件 $a_x \ll r$, $a_y \ll r$ を満たすとき

で与えられ、離隔の二乗に反比例して減衰し、電線間の離隔 a_x, a_y が大きいほど発生量が増大する。上式では剰余項を省略したが、式(2)が零となる条件では次項の離隔の三乗に反比例する成分が主体となる⁶⁾。

一方、電気機器などが発生する磁界は例えば変圧器の場合、その漏れ磁界は磁気四重極子（逆位相の磁気双極子を近接させた特性）としてモデル化され、離隔の四乗に反比例して減衰する（特別な条件下では五乗に反比例）性質がある。離隔に対する磁界の減衰特性を比較すれば（図 3）、離隔に対する次数の低い特性を有するものほど遠方まで影響が及ぶことが分かる。以上を勘案すれば変電所全体の電磁環境を考慮する際には、主たる発生源として電線路の影響のみを考えれば良いことになる。

3. 電磁界低減の方法

電磁界の低減対策には大きく二つのアプローチが存在する。一つ目は発生源において対策を行うことで、電磁界の発生量の低減を図る方法である。二つ目は暴露を受ける側で対策を行うことで、電磁界の暴露量を低減する方法である。本報告は前者の方法を対象としている。

低周波電磁界の低減対策において、特に重要かつ困難であるのが磁界の低減である。電界につ

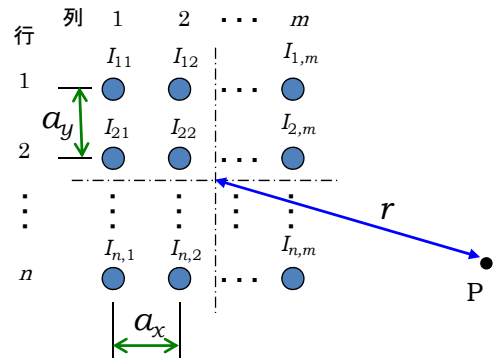


図 2 $N \times M$ 導体の電線路モデル

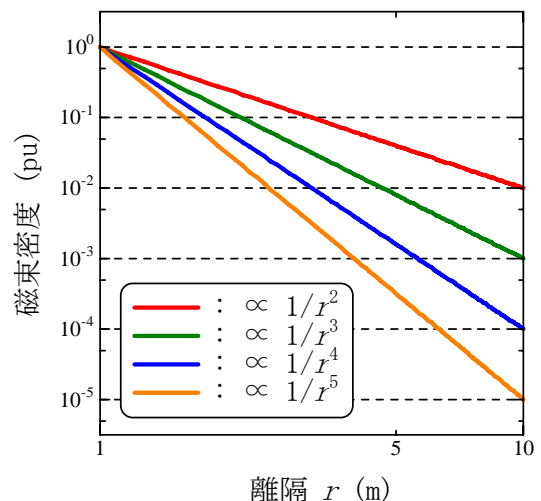


図 3 磁界減衰特性の分類

いては機器外箱や建屋などで容易に遮へいすることができること、国内では既に厳しい基準値において管理されていることから、電力設備においては通常問題とはならないとされている¹⁾。

電力設備の磁界低減対策として、通電電流を低減させる方法、電線配置（相順）の最適化による方法、強磁性体や金属のカバーで磁気遮へいを行う方法、補償電線（回路）を別に設ける方法、などが実施されている¹⁾。この中で電鉄用変電所に適用可能と考えられるものは、電線配置の最適化と磁気遮へいである。後者についてはバスダクトや GIS の採用によって導入が可能であるが、設備の大型化とコスト増加を伴うため全ての変電所での採用は難しい。そこで本報告では、最も低コストで汎用的な方法であると考えられる、電線配置の最適化による低減対策を検討した。

電線配置の最適化による磁界低減対策は、同じ通電電流において電線路の発生磁界（式(2)）を最小化する問題として定式化され、全ての電流通電のモードを考慮した上で最適化を行う。

4. 直流変電所における磁界低減対策

4.1 直流変電所が発生する磁界の一般的特性

本報告では直流き電用変電所を例とし、その磁界低減対策について述べる。直流磁界の主な発生源は直流主回路である。特に開閉器の周辺やき電送り出し部など、往復線の離隔が大きくなる箇所では発生量が大きくなる（図 4）。また、直流変電所においても交流電線路が存在するため交流磁界が発生する。整流器用変圧器と整流器間の交流ダクト（直流負荷電流のオーダーの大電流が通電）の周辺では特に大となる。

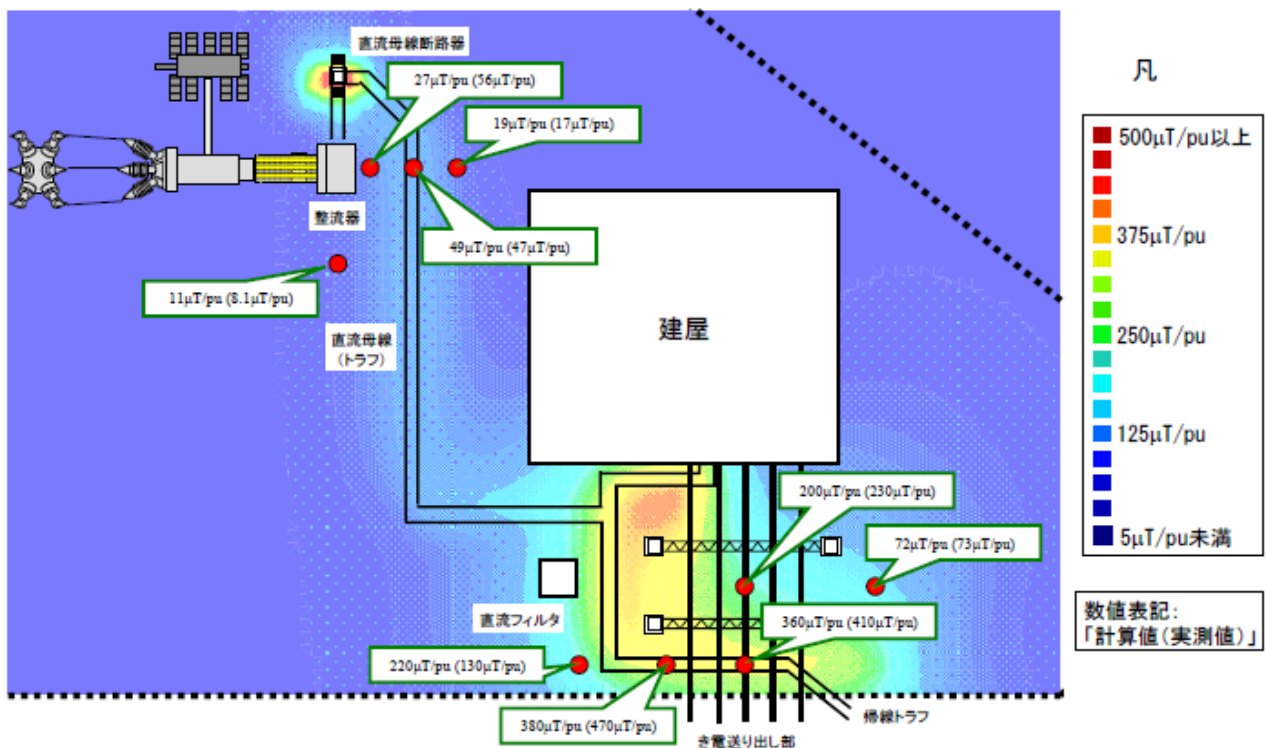


図 4 直流き電用変電所における直流磁界の分布（整流器の定格出力時、高さ 1m）

4.2 磁界低減対策を適用した直流変電所の設計例

低周波磁界の一般的特性として、往復線（正負など）を接近させることで低減することが可能であるが、機械的保持、絶縁離隔等とのトレードオフを十分考慮する必要があり、電線配置の最適化による低減対策を併用するなど、全体のバランスを勘案しつつ複数のアプローチで行う必要がある。

直流変電所の直流主回路の母線部とき電送り出し部に対する、磁界低減可能な配線例を図 5 に示す。これらの対策は前述の往復線間を接近させることによる効果とは別種であり、電線の相順を工夫することで大きな効果が得られる特長がある（両者併用でさらに効果は高まる）。

特に同図(a)に示す直流母線の配置は最良解であり、発生磁界は離隔の三乗に反比例して急激に減衰する。対策効果の検証を一般的な配線との比較において解析的に実施した（図 6）。効果は条件により異なるが、本例では発生量が 1/3～1/4 程度に低減されることが分かる。

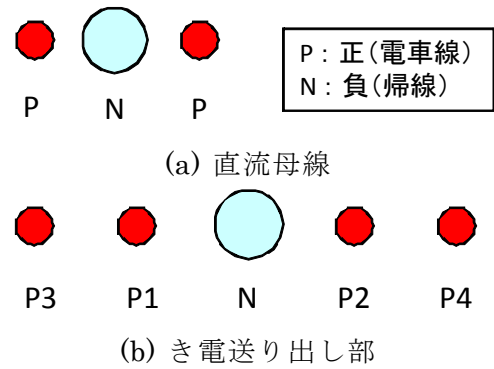


図 5 磁界低減可能な主回路配線例

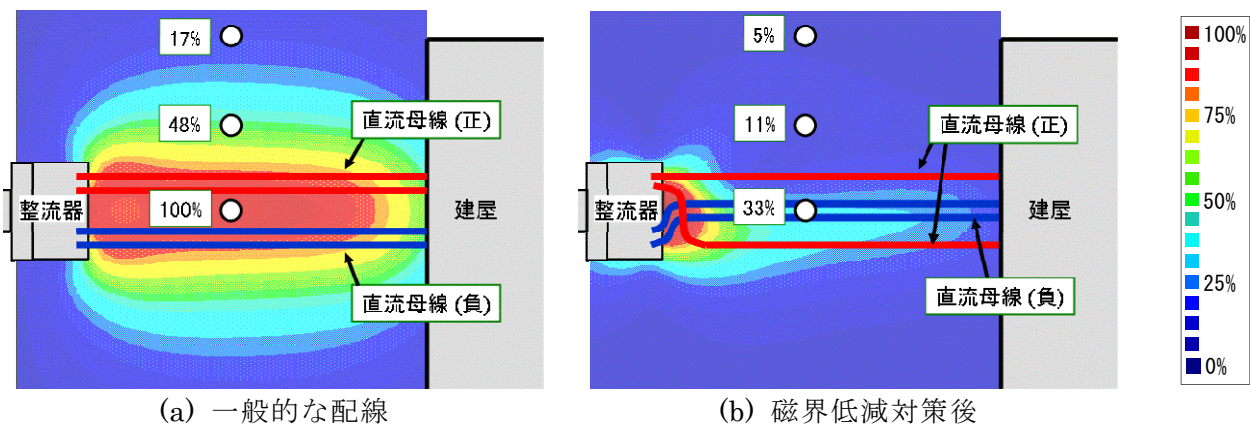


図 6 直流母線に対する磁界低減対策の効果検証（高さ 1m における相対値）

5. おわりに

電気鉄道用変電所の発生する電磁界の特性と計算手法、その低減対策の方法と設計例について効果検証を含めて紹介した。提案手法は対策のために特別な設備が不要で簡易な手法であり、一部の新規変電所には導入が行われている。今後も本課題に関する検討を継続する予定である。

【文献】

- 1) 経済産業省 原子力安全・保安部会 電力安全小委員会： 電力設備電磁界対策ワーキンググループ（報告書），2008
- 2) ICNIRP, “Guidelines on Limits of Exposure to Static Magnetic Fields,” Health Physics, Vol. 96, No. 4, 2009
- 3) ICNIRP, “Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz),” Health Physics, Vol. 74, No. 4, 1998
- 4) EN 50500, “Measurement procedures of magnetic field levels generated by electronic and electrical apparatus in the railway environment with respect to human exposure,” 2008
- 5) 石塚和夫, 戸田幸生, 河本博, 水間毅： 電力線からの磁界の簡易計算法(第一報), 平成 8 年電気学会全国大会, 1996
- 6) 岸本保夫： 電力線周辺における低周波磁界の解析と電磁障害対策, NTT 建設総合研究所報告, 2006