

令和元年6月24日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06971

研究課題名（和文）出力変動型電源の本格的大量導入に向けた地中送電ケーブルの導体温度型送電容量評価

研究課題名（英文）Dynamic Thermal Ratings of Underground Transmission Cables Towards High Penetration of Intermittent Renewable Energy Sources

研究代表者

杉原 英治（Sugihara, Hideharu）

大阪大学・工学研究科 准教授

研究者番号：10359854

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：出力変動電源の大量導入を見据えて送電容量問題に着目し、送電ケーブルの導体温度に基づき送電容量評価を行った。特に、変動電源により通電電流が従来よりも短時間で大きく変化することに着目し、ケーブル導体温度を推定するための熱等価回路モデルにおいて絶縁体層やシース層の適切な分割数について定量的な考察を行った。さらに、導体部分の発熱量を正確に評価するため、導体部分の表皮効果、近接効果、さらにDC抵抗値の温度依存性を考慮して、導体温度推定に与える影響を評価した。これらの要因を考慮した熱等価回路モデルを構築し、ステップ電流変化を評価した結果、導体温度が上限値に達するまでに1時間程度の遅れがあることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地中送電ケーブルに流すことのできる最大電流は、熱に弱い絶縁体が曝される最も高温になる部分として導体部分の温度上限値に基づき決められている。本研究では、太陽光発電や風力発電により通電電流が従来よりも短時間で大きく変化することに着目し、ケーブル導体温度を推定するための熱等価回路モデルについて検討した。評価結果より、瞬時的な電流変化に対して導体温度が上限値に達するまでに1時間程度の時間遅れがあることを示した。このことから蓄電池等の高速応答可能なリソースだけでなく、火力発電機の出力調整や需要家の空調設備等の比較的ゆっくりとしたリソースでも過負荷解消に利用できる可能性があることを示した。

研究成果の概要（英文）：Assuming that intermittent renewable generation is sinusoidal line current based on root-mean-square (RMS), this study evaluates the conductor temperature of a single-core XLPE underground cable. To analyze the increase in the temperature of the cable, the multistage Cauer-type thermal equivalent circuit model for XLPE cables consisting of several parts of thermal resistance and thermal capacitance is applied for representing the heat transfer more precisely from the central conductor to the outer protective sheath. Moreover, this study evaluates the temperature dependency of the effective AC conductor resistance of power cables for dynamic line ratings. Through the numerical simulations, although the line current changes as the step increases, there is still a 60-min time margin to reach the conductor temperature limit. From the viewpoint of transmission-line congestion relief, this is a significant advantage of the dynamic line ratings of underground cable systems.

研究分野：電気エネルギーシステム工学

キーワード：地中送電ケーブル 導体温度 熱等価回路

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

これまでに世界各国の電力システムにおいて、景観の問題が少なく周辺住民の受容性も高いことから地中送電ケーブルは非常に多く用いられている。特に、都市部に近い地域供給システムでは地中ケーブルの割合が高くなっており、近年大量導入が見込まれている風力発電や大規模太陽光発電（メガソーラ）が連系されることも多いため、地域供給システムレベルでの送電容量制約の問題が顕在化している。特に風力発電やメガソーラの設置場所は、これまで周辺の電力需要が小さく元々送電容量も小さい場所が多いため、送電線過負荷の問題が生じやすい。

一般に送電線定格電流（常時許容電流）は、通電電流として定常状態を仮定した上で電線・ケーブル本体の導体温度上限値に基づき決められている。すなわち、出力変動型電源の大量導入に伴い送電線の通電電流が変動することは想定されていないため、本格的な大量導入時に向けて本来の電線・ケーブルの導体温度上限制約に立ち返って送電容量制約を評価する必要がある。

2. 研究の目的

本研究課題では、我が国の地域供給システムで多く用いられている管路・洞道方式の地中送電ケーブルを対象として、再エネ電源の出力変動に起因する通電電流の変動や事故時のステップ電流変化を対象として、本来のケーブル導体温度評価に基づく地中ケーブル送電容量を評価することを目的とする。特に、ケーブル導体温度を推定する手法として熱等価回路モデルに着目し、出力変動型電源の大量導入を想定した通電電流変化に対して、導体温度を精度よく推定可能なカウア型等価回路モデルについて検討する。また、導体温度を正確に推定するには、導体部分のジュール発熱のモデル化が重要であり、表皮効果や近接効果も含めた交流導体実効抵抗値の温度依存性について検討する。さらに、通電電流変化としては事故時のステップ状の変化も想定し、導体温度上昇の時間遅れについて評価することにより、デマンドレスポンス等による過負荷解消制御の可能性について検討する。

3. 研究の方法

研究の方法としては、地中送電ケーブルの送電容量評価に向けて、大きく分けて(1)地中送電ケーブルの熱等価回路モデルの構築と、(2)ケーブル交流導体実効抵抗値の温度依存性に関する研究を実施した。それぞれの概要を以下に述べる。

(1) 熱等価回路モデルの構築

単心 CV ケーブルの断面図を図 1 に示す。一般に内部半導電層と外部半導電層は薄く、熱伝導の観点からは大きな影響を与えないことから単純化のため無視することとした。中心の導体部分で発生した熱が外皮表面まで伝搬する様子は、カウア型の等価回路を用いて表現できる。ただし、熱容量の大きな絶縁体層やシース層を一組の熱抵抗と熱容量で表現すると、導体温度推定誤差が大きくなるため、それらの部分を複数段に分割する手法を採用した。絶縁体層に着目し、通電電流をある変化幅で周期的に変化させた場合を想定し、分割数を増やしたときの温度変化幅を図 2 に示す。絶縁体部分の分割数が 1 段の場合、通電電流の変化に対して導体温度の変化幅が追従しきれていないことが分かる。分割数を増や

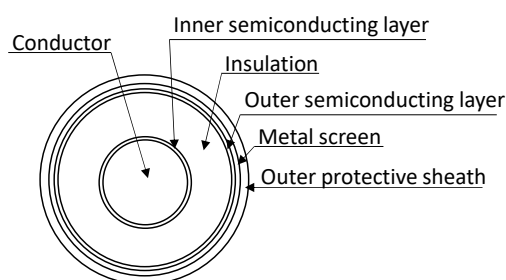


図 1 単心 CV ケーブルの断面図

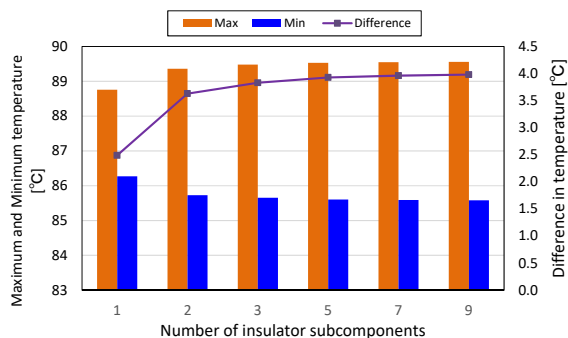


図 2 絶縁体層の分割数を変えたときの通電電流変化に対する導体温度応答幅

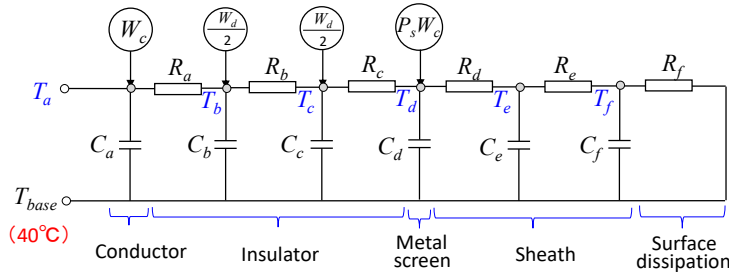


図3 本研究課題において構築した熱等価回路モデル

すことにより導体温度の変化幅は大きくなり、増やし過ぎても温度推定精度の改善効果は見込めないことが分かる。今回は絶縁体層に関しては3段に分割するケースを採用した。また、同様の考え方によりシース層を複数段に分割した結果、シース層は2段に分割すれば十分であることが分かった。以上の解析に基づき、本研究で構築した熱等価回路モデルを図3に示す。洞道方式の基底温度を40°C一定であるものとし、導体部分のジュール発熱(W_c)、誘電体損(W_d)、シース損($P_s W_c$)を考慮して導体温度(T_d)のシミュレーション評価を実施した。

(2) 交流導体実効抵抗値の温度依存性の評価

ケーブル導体温度を推定する際、導体部分のジュール発熱を正確に算出することは非常に重要である。ケーブルに交流電流を通電する際の実効抵抗値は、表皮効果、近接効果、直流抵抗値自身の温度依存性を考慮して以下のようにモデル化される。

$$R = r_0 \cdot (1 + \lambda_T) \cdot (1 + \lambda_S + \lambda_P) \quad (1)$$

ここで、 r_0 :直流抵抗(20°C)、 λ_T :直流抵抗値の温度依存性を表す係数、 λ_S :表皮効果係数、 λ_P :近接効果係数

まず、直流抵抗値の温度依存性については、導体温度 T_c 、抵抗温度係数 α を用いて以下のように表される。

$$\lambda_T = \alpha \cdot (T_c - 20) \quad (2)$$

次に交流電流を通電する場合には表皮効果と近接効果が生じ、円筒座標系におけるマクスウェル方程式より、(1)式の係数 λ_S 、 λ_P は以下のように表される。

<表皮効果係数>

$$\lambda_S = F(X) = \frac{X \cdot (\text{ber}(X) \cdot \text{bei}'(X) - \text{bei}(X) \cdot \text{ber}'(X))}{2 \cdot \{(\text{ber}'(X))^2 + (\text{bei}'(X))^2\}} - 1 \quad (3)$$

$$X = \sqrt{\frac{8\pi f \cdot \mu_s \cdot K_{S1}}{r_0 \cdot (1 + \lambda_T) \cdot 10^9}} \quad (4)$$

<近接効果係数>

$$\lambda_P = \frac{3}{2} \left(\frac{d_1}{S} \right)^2 \left\{ G(X') \left/ 1 - \frac{5F(X)}{24G(X')} \left(\frac{d_1}{S} \right)^2 \right. \right\} \quad (5)$$

$$G(X') = \frac{X' \cdot (\text{ber}(X') \cdot \text{ber}'(X') + \text{bei}(X') \cdot \text{bei}'(X'))}{4 \cdot \{(\text{ber}(X'))^2 + (\text{bei}(X'))^2\}} \quad (6)$$

$$X' = \sqrt{0.8} \cdot X \quad (7)$$

ここで、 T_c :導体温度、 α :抵抗温度係数、 f :周波数、 μ_s :透磁率、 K_{S1} :導体分割を表す係数(4分割導体:0.6)、 S :導体中心間隔、 d_1 :導体外径、 $\text{ber}()$ 、 $\text{bei}()$:第一種ベッセル関数(0次)の実部および虚部、 $\text{ber}'()$ 、 $\text{bei}'()$:第一種ベッセル関数(0次)の導関数の実部および虚部
近接効果の評価にあたっては、他相ケーブルとの位置関係が必要であり、ケーブル外径だけ離れている場合と、他相ケーブルと完全に接している場合について評価する。また、表皮効果と近接効果は、導体温度依存性を有するが、これは温度上昇に伴い直流抵抗値が変化し、導体断面の電流分布(表皮深さ)が変化するためである。

図1に示したケーブルを対象として、直流抵抗値の温度依存性や表皮効果係数、近接効果係数の導体温度依存性を評価した結果を図4に示す。同図において、表皮効果係数と近接効果係数については、導体温度上昇とともに電流集中が緩和されるため、両係数は小さくなる。一方、抵抗値の温度依存性は、今回対象とする温度範囲においては線形と仮定できるため、同図のように図示することができる。同図より、導体温度が40℃程度以下であれば、表皮効果が最も大きな値を有するが、それ以上の温度になると抵抗値の温度依存性が支配的となるため、ケーブル導体温度を評価する際には、抵抗値の温度依存性を考慮することが不可欠となる。

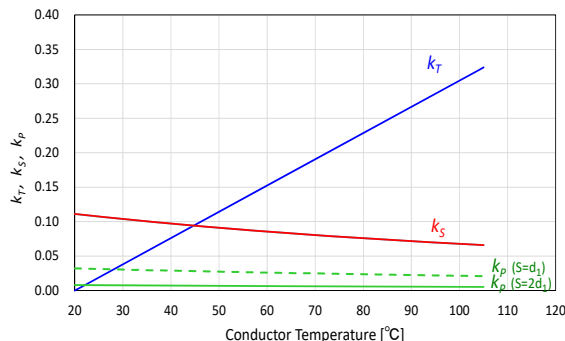


図4 直流抵抗値の温度依存性と、表皮効果係数、近接効果係数の温度依存性の比較

4. 研究成果

(1) 熱等価回路モデルを用いた導体温度シミュレーション評価

出力変動型電源の大量導入に起因するケーブル通電電流変化を模擬するため、図5に示すようにケーブル導体温度が定常状態で85℃となる1449[A]を基準として、振幅453.6[A]（常時許容電流1512[A]の30%相当）の正弦波電流を重畳し、ケーブル導体温度のシミュレーション評価を行った。ただし、ここでは火力機の経済負荷配分により対応可能な変動周期の一例として、変動周期30分を仮定した。また、最大値が同じ値となるステップ電流変化を印加して、ケーブル導体温度をシミュレーション評価して、比較検討を行った。

それぞれの通電電流に対する導体温度シミュレーション結果を図6に示す。ステップ状の電流変化の場合、常時許容温度90℃を超えるまでに必要な時間は約14分となっており、短時間許容温度として用いられることのある105℃まで到達するのに要する時間は100分程度となっている。これに対して、正弦波状の通電電流を重畳した場合、9時間以上を経過した定常状態においても常時許容温度の90℃に達していないことを確認した。すなわち、図5に示した正弦波状の電流を重畳した電流変化は、非常に速い変化を示しており、常時許容電流(1512[A])を周期的に超えているが、導体温度で評価すると常時許容温度を超えない。従って、ケーブル導体温度の観点からは、送電容量以内に収まっているといえる。

さらに、ケーブル自体が周囲温度に与える影響を評価するため、図3にしめす等価回路において、各部の温度変化（定常状態）を評価した結果を図7に示す。重畳する正弦波電流は、30分周期だけでなく、60分、120分周期のケースも併せて評価した。ケーブル外皮の温度は T_f であるが、ステップ電流変化時には約13℃上昇しており、ケーブル周辺（他

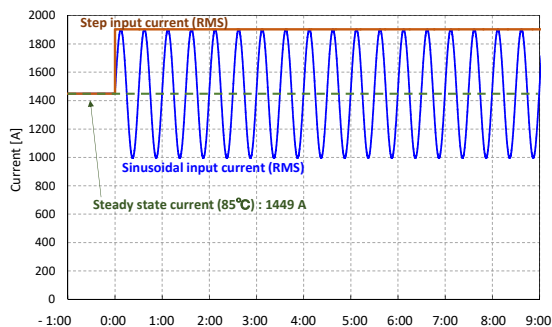


図5 ケーブルへの通電流変化

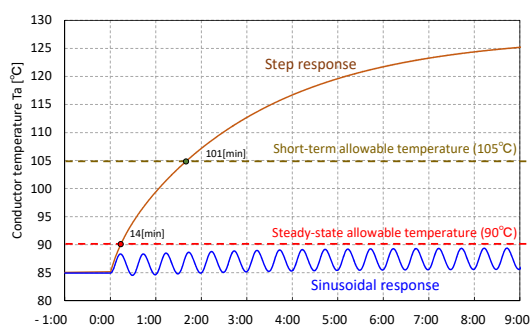


図6 ケーブル導体温度の時間変化

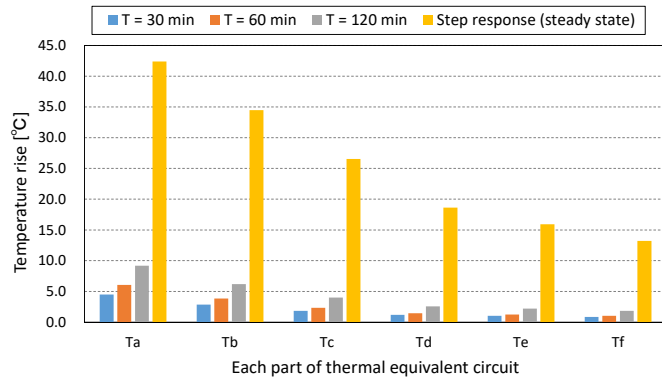


図7 熱等価回路におけるケーブル各部温度上昇（定常状態）

相や他回線のケーブル）に与える熱的な影響を考慮する必要があるものと考えられる。しかしながら、正弦波状に変化する電流であれば、 T_f の温度上昇は 2°C 以下であり、ケーブル周辺に与える影響はほぼ無視して考えることができる。

(2) 交流導体実効抵抗値の温度依存性を考慮した導体温度シミュレーション結果

交流導体実効抵抗値の温度依存性を評価するため、表1に示すようにいくつかのシミュレーションケースを設定した。Case 0は、温度依存性を全く考慮せず、Case 1は直流抵抗値の温度依存性のみを考慮した場合は表す。Case 2とCase 3は、表皮効果と近接効果も考慮しているが、導体温度としてそれぞれ 90°C 一定、 20°C 一定を仮定した場合をそれぞれ表す。

図8は、ステップ電流変化を与えた場合の温度変化を表す。Case 0とCase 1は大きく異なり、直流抵抗値の温度依存性は導体温度に大きな影響を与えることが分かる。Case 2とCase 3は、どちらも表皮効果と近接効果が含まれており、想定する導体温度が異なるが、両者の幅はそれほど大きくはない。また今回は 90°C 一定と 20°C 一定を想定しており、実際の導体温度の時間変化も両者の間に含まれるものと考えられる。さらに(3)式のベッセル関数を近似してCase 4として図示した結果を図9に示す。同図によるとCase 4は、導体温度を 90°C と仮定したケース2と良く一致しており、Case 2が最も適切に導体温度を表しているものと考えられる。

表1 交流導体実効抵抗値の温度依存性を評価するためのケース設定

	Temperature dependence of DC resistance (λ_T)	Skin Effect and Proximity Effect (λ_S, λ_P)
Case 0	-	-
Case 1	○	-
Case 2	○	○ (90°C)
Case 3	○	○ (20°C)

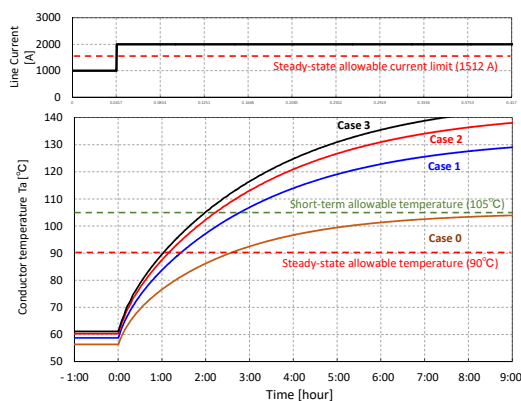


図8 電流変化に対する導体温度変化

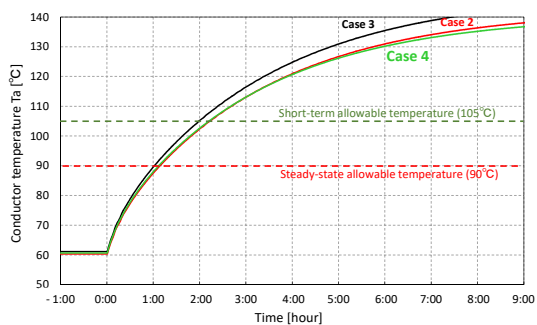


図9 電流変化に対する導体温度変化

以上のことから、出力変動型電源の大量導入や送電線事故時のステップ電流変化を想定し、精度良く導体温度を推定可能な熱等価回路モデルを構築した。2回線送電ケーブルの1回線事故時のステップ電流変化に対して、ケーブル導体温度の上昇は60～70分程度遅れて温度上限値に到達することを確認することができた。これは、送電ケーブルの過負荷を解消する手段として、蓄電池のような高速に応答可能なデマンドレスポンス資源だけでなく、需要家設置の空調負荷、蓄熱槽等のように比較的低速なデマンドレスポンス資源でも過負荷解消手段の一つになりうる可能性があることを示唆している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2件)

(1) Hideharu Sugihara, Tsuyoshi Funaki : "Analysis on temperature dependency of effective AC conductor resistance of underground cables for dynamic line ratings in smart grids", Proceedings of The 17th IEEE international conference on smart city (SmartCity-2019), Accepted, Zhangjiajie, China (2019) 査読有

(2) Hideharu Sugihara, Tsuyoshi Funaki : "Fundamental Analysis of Electrothermal Coordination of Underground Cables toward High-Penetration Renewable Generation", Proceedings of IEEE Power and Energy Society General Meeting, No. 18PESGM0623, pp.1-5, Portland, OR (2018) 査読有

〔学会発表〕(計 3件)

(3) 杉原英治, 舟木 剛:「電力ケーブルの送電容量評価に向けた交流導体実効抵抗値の温度依存性に関する基礎検討」, 平成31年電気学会全国大会, No.1-026, (2019)

(4) 杉原英治, 舟木 剛:「出力変動型電源の大量導入に向けた地中送電ケーブルの熱等価回路モデルに関する検討 -単心CVケーブルに対する解析-」, 平成29年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集(論文II), No.280 (2017)

(5) 杉原英治, 舟木 剛:「出力変動型電源の大量導入に向けた地中送電ケーブルの導体温度評価に関する基礎検討 -単心CVケーブルの熱等価回路モデルに関する一考察-」第36回エネルギー資源学会研究発表会, No.7-4, 砂防会館, 東京, (2017)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0件)

○取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。