

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：34504

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04965

研究課題名（和文）地中送配電ケーブル導体温度モデルに基づく系統潮流マネジメント手法の開発

研究課題名（英文）A power Flow Management Method based on Conductor Temperature Model of Transmission and Distribution Cables

研究代表者

杉原 英治（Sugihara, Hideharu）

関西学院大学・工学部・教授

研究者番号：10359854

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、再生可能エネルギーの大量導入時における送配電システムの混雑緩和に向けて、送配電ケーブルの熱等価回路モデルを構築し、シミュレーションと実験によりモデルの妥当性を検証した。その上で日射強度の実測データを用いてケーブル通電電流制御の効果検証を行い、従来の定格電流による線路潮流制限に比べ、導体温度に基づく線路潮流制約時のメリットを定量的に明らかにした。また、送配電ネットワークの主たる構成要素である架空送電線にも着目し、導体温度の有限要素解析モデルを構築し、風洞実験結果と比較検証した結果、従来のCIGREモデルに比べて、特に低風速時において高精度に導体温度を推定できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高圧配電システムで用いられている架空配電ケーブル(OC-W)を対象として熱等価回路モデルを構築し、導体温度制約下における通電電流制御の効果検証を行うことにより、配電システムの潮流計算に考慮することによるメリットを定量的に示した。また、架空送電線の導体温度を推定するための有限要素解析(FEM)モデルを開発し、特に低風速時において風洞実験による導体温度の測定結果を高精度に再現できる可能性を示した。これらのモデルは、今後、様々な条件下で妥当性を検証する必要があるものの、将来的に送配電ネットワークの有効利用の観点から有用なモデルになる可能性があると考えられる。

研究成果の概要（英文）：One of the serious concerns is the power flow congestion problem in transmission and distribution lines towards high penetration of intermittent renewable energy resources. This study develops a thermal equivalent circuit model of insulated wire in medium-voltage distribution network, and the thermal equivalent circuit model is validated by simulations and experiments. The line conductor temperature can be evaluated using the model assuming a high penetration of photovoltaic systems in distribution networks. Comparing with the conventional line current limit of power flow, the proposed conductor temperature limit can flow more line current by thermal inertia characteristics of insulated wires. Consequently, through some case studies, the more fluctuation the line current has, the more advantage the temperature-based distribution line capacity can obtain.

研究分野：電力工学

キーワード：電力ネットワーク 送配電ケーブル 架空送電線 熱等価回路モデル 熱時定数

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

再生可能エネルギーの導入量増加に向けて、技術的課題の一つとして送電容量の課題が挙げられる。電力設備の観点から、地中送配電ケーブルは、年単位や月単位の長期的な劣化評価や余寿命評価のため古くからケーブル導体温度監視が行われていたが、短期的な運用計画(日間運用等)の視点からは導体温度評価に基づく送電容量評価は必ずしも十分に行われてこなかった。同じく送配電ネットワークを構成する架空送電線に関しては、一部の系統において周囲温度の季節別変化を考慮した送電容量が設定されているものの、送電容量に大きな影響を与える風速の変化は考慮されていない。

2. 研究の目的

太陽光発電や風力発電といった出力変動型再生可能エネルギーの大量導入に向けて、送配電ケーブルや架空送電線の導体温度モデルを開発するとともに、シミュレーションや実験に基づきモデルの妥当性を検証する。構築された導体温度モデルを用いて、導体温度制約に基づき通電電流を制御する場合と定格電流に基づき電流制約を課した場合を比較し、その有効性を定量的に評価することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究課題では、再生可能エネルギーの大量導入時における送配電システムの混雑緩和に向けて、以下の3つの内容について検討を行った。

- (1) 送配電ケーブルの熱等価回路モデルの構築と妥当性検証
- (2) 日射強度の実測データに基づくケーブル通電電流制御の効果検証
- (3) 架空送電線導体温度モデルの構築と妥当性検証

4. 研究成果

(1) 送配電ケーブルの熱等価回路モデルの構築と検証

対象とする送配電ケーブルとして、6.6kV 高圧配電線(OC-W 60 mm²)を図1に示す。送配電ケーブルの導体温度モデルとして、構築した熱等価回路モデルを図2に示す。本ケーブルは導体と絶縁体の2層からなり、等価回路モデルも2段のカウア型回路を用いて構築した。

構築した熱等価回路モデルの妥当性を検証するため、等価回路モデルにおいて対象配電線の定格電流 280A を通電し、導体温度およびケーブル表面温度を推定した結果を図3に示す。推定された導体温度は、定常状態において常時許容温度の 90 に達しており、等価回路モデルの熱抵抗値(合計値)は妥当な値が得られていることを確認した。

また、実験により定格電流 280A 通電時のケーブル表面温度を測定した。実験の様子と測定結果を図4に示す。ケーブル表面温度は3カ所で測定したが、概ね等しい測定結果となった。また、等価回路モデルによるケーブル表面温度と比較した結果、特に表面温度の立ち上がり時においてよく一致していることから、等価回路モデルの熱容量も概ね妥当な値が得られたものと考えられる。

(2) 日射強度の実測データに基づくケーブル通電電流制御の効果検証

太陽光発電が大量導入された配電システムを想定し、実測された日射強度データ(1分刻み)を用いて通電電流を流した場合の導体温度をシミュレーション評価した。

一日における日射強度変化の大きさが中程度の日を対象として、元の通電電流変化に対して、従来の電流制約を課した場合と、提案する導体温度制約を課した場合のシミュレーション結果を、それぞれ図5(a)(b)に示す。同図(a)の電流制約の場合、常時許容電流(280A)を超える場合に一律に電流が制限されるのに対して、同図(b)の導体温度制約の場合、一時的に常時許容電流を超える電流を流すことができ、結果として送電可能な電流量を増加させることができる。

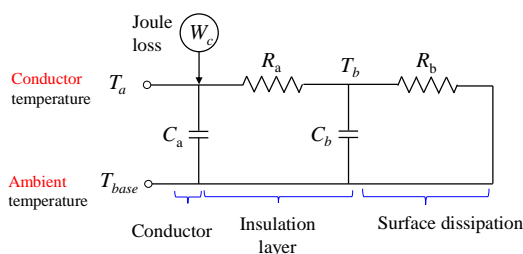
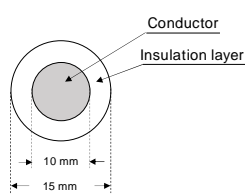
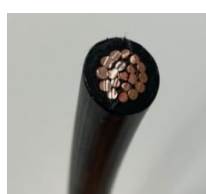
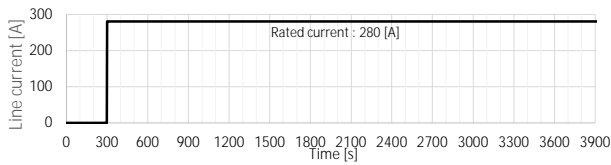
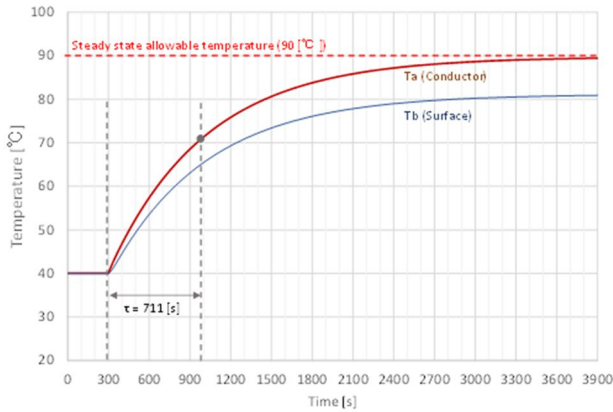


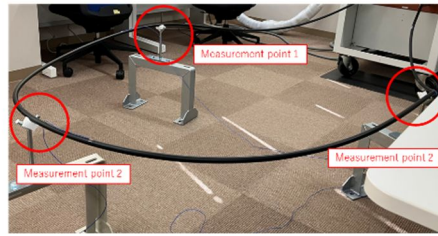
図1 6.6kV 高圧配電ケーブル(OC-W 60 mm²) 図2 高圧配電ケーブルの熱等価回路モデル



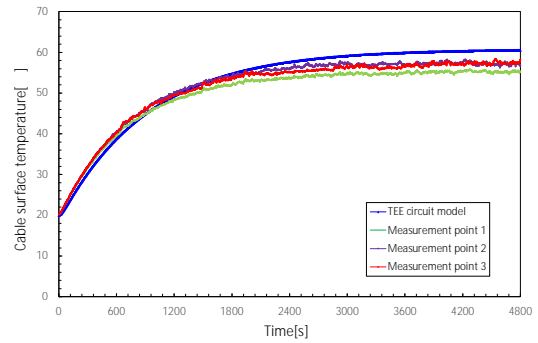
(a) ステップ電流の変化



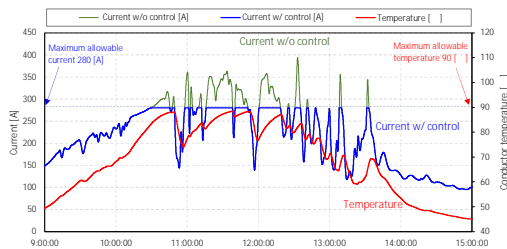
(b) 推定されたケーブル温度と時定数
図3 熱等価回路モデルのステップ応答



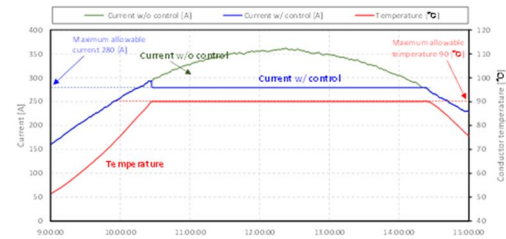
(a) 実験の様子



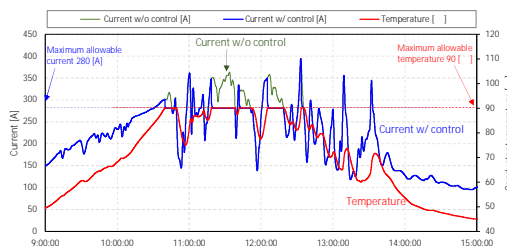
(b) ケーブル表面温度の測定結果
図4 ケーブル表面温度の測定実験



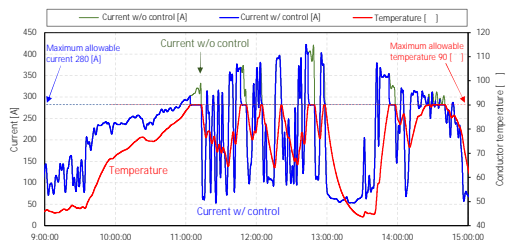
(a) 電流制約における通電電流と導体温度



(a) 短時間の電流変化が生じないケース (Case B)



(b) 導体温度制約における通電電流と導体温度
図5 電流制約と導体温度制約の比較 (Case A)



(b) 短時間の電流変化が頻繁に生じるケース (Case C)
図6 導体温度制約における通電電流制御

異なる電流変化条件における結果として、短時間の電流変化がほとんど生じないケース (Case B)と短時間の電流変化が頻繁に生じるケース (Case C)について導体温度制約ケースの電流制御結果を図6(a)(b)に示す。短時間の電流変化が頻繁に生じるケースの方が、ケーブル導体温度の熱的慣性により時間遅れを伴って導体温度が変化することから、導体温度制約のメリットが大きくなるのが分かる。

(3) 架空送電線の導体温度モデルの検証

送配電ネットワークの構成要素の一つである架空送電線に着目し、導体温度モデルとして有限要素解析(FEM)モデルを構築し、風洞実験による測定結果を用いて妥当性検証を行った。特にFEMモデルでは、詳細なより線構造を考慮することなく導体部分を簡易な円筒型モデルとして表現し、導体温度分布は等価的な熱伝導率を低く設定することで表現した。FEMモデルと、従来法のCIGREモデル、風洞実験による測定結果との比較を表1に示す。

FEMモデルは、低風速の0.5m/sや2m/sの場合、従来法のCIGREモデルと比べて、風洞実験による測定結果と良く一致する結果が得られ、架空送電線の導体温度を高い精度で推定できる可能性を示した。今後の展開として、送配電ケーブルと架空送電線の熱時定数の違いを考慮した通電電流制御手法の開発などが挙げられる。

表1 導体温度の風洞実験，FEMモデル，CIGREモデルの比較（風速0.5m/s，2m/s）

Case	周囲環境条件			導体平均温度 [°C]			実験値との誤差 [°C] (() 内は誤差率 [%])	
	風速 [m/s]	電流 [A]	風温 [°C]	風洞実験 (4点平均値)	FEM simulation (4点平均値)	CIGRE model	FEM simulation	CIGRE model
1	0.55	399.1	41.2	79.7	77.7	66.9	2.0 (5)	12.8 (33)
2	2.04	296.6	40.4	51.6	50.7	48.9	0.8 (8)	2.7 (24)
3	2.00	400.7	40.3	60.6	59.8	56.3	0.8 (4)	4.3 (21)
4	2.03	498.6	39.7	72.3	70.5	64.9	1.8 (6)	7.4 (23)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 澤野大、杉原英治
2. 発表標題 風洞実験に基づく架空送電線の導体温度FEMモデルとCIGREモデルの比較検証
3. 学会等名 令和6年電気学会全国大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 澤野大、杉原英治
2. 発表標題 ダイナミックレーティング適用に向けた架空送電線の導体温度FEMモデルの構築と検証
3. 学会等名 令和5年電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hideharu Sugihara
2. 発表標題 Overload Evaluation of MV Distribution Lines based on Thermal Inertia Characteristics under High Penetration of PVs and EVs
3. 学会等名 The 3rd IEEE International Conference on Industrial Electronics for Sustainable Energy Systems (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 杉原英治
2. 発表標題 変動型電源/負荷の大量導入に向けた架空配電ケーブルの導体温度モデルに基づく過負荷評価
3. 学会等名 第65回自動制御連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hideharu Sugihara, Tsuyoshi Funaki
2. 発表標題 Temperature-Based Overload Evaluation in Low-Voltage Distribution Lines Considering PVs and EVs: Model Validation and Simulations
3. 学会等名 14th IEEE PowerTech 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関