管路布設ケーブルの短時間送電容量リアルタイム計算 に関する理論的検討

正員 坂田 学 (早稲田大学・東北電力) 正員 岩本 伸一 (早稲田大学)

Theoretical Study on Real-Time Rating of Short-Time Thermal Capacity of Duct-Installed Power Cables

Manabu Sakata, Member (Waseda University & Tohoku Electric Power Co., Inc.)

Shinichi Iwamoto, Member (Waseda University)

Recently utilities promote various researches to use existing equipments more effectively. Until now JCS (Japan Cable Maker's Association Standard) method has been used to calculate the thermal capacity of power cables. However, in order to use existing power cables more effectively, detail calculations considering time varying thermal resistance and capacitance of surrounding soil are necessary. Regarding duct-installed power cables, duct temperatures can be measured by optical fiber distribution sensors which have been developed recently.

In this paper we propose a method to calculate the short-time thermal capacity of duct-installed power cables. The proposed algorithm is based on the estimation of the thermal resistance and capacitance of surrounding soil using continuously measured duct temperatures. In this algorithm an observer is used for the estimation of conductor temperatures, and also Genetic Algorithm is employed to estimate the thermal resistance and capacitance of surrounding soil accurately. The effectiveness of the proposed algorithm is demonstrated using the experiment data. It is shown that the application of proposed method improves the short-time thermal capacity of duct-installed power cables considerably.

キーワード: 管路布設ケーブル、短時間送電容量、光ファイバー分布型温度センサ、オブザーバー、遺伝的アルゴリズム

1. まえがき

電力需要は今後も堅調な伸びを示すことが予想され、大規模な電源・系統立地を展開する必要がある一方、地権者の権利意識の高まり・環境保護の立場から、新たな系統立地が一層困難になることが懸念されている。このため、電力各社においては、既設設備が本来有している機能を最大限に活用するための様々な技術開発を推進している。

これまで、地中送電線の送電容量の計算にはNeherの式[1]に基づいて定められた日本電線工業会規格(JCS)による許容電流計算式[2]が用いられてきた。この計算式は送電容量計算における様々な不確かさに対して、安全側に裕度を持たせることで対応した汎用性の高い計算手法として、電力各社で広く用いられている計算式である。しかしながら、既設設備の有効活用を図るためには、当該線路の布設・運用状況を考慮に入れる必要があり、特に時々刻々変化する負荷電流、基底温度、土壌の熱抵抗・熱容量等を正確に把握・推定した上での送電容量の算定が不可欠である。

米国においては、高油圧OFケーブル(HPOF)線路のパイプ温度等を熱電対により監視し、送電容量をリアルタイム計

算するシステムが一部運用されている[3][4]。しかし、これらのシステムにおいても、送電容量を計算している地点が必ずしもホットスポット(送電容量のネックとなる導体温度最高地点)とは限らないこと、またケーブル・土壌部の温度変化を表す熱的近似モデルに簡略モデル(exp関数の組合せ)を用いていること等の不確かさを払拭できず、我が国において同様のシステムがこれまで実用化された例はない。

一方、近年、ケーブル長手方向の温度の測定ができ、当該線路のホットスポットを正確かつ容易に同定することが可能な光ファイバー分布型温度センサ[5]が開発・実用化され、これを管路布設ケーブル線路の管路内にOPC-V,T工法(Optical Fiber along Power Cable - Vacuum and Tube)を用いて通線・配置し、管路内温度の監視ならびに常時送電容量を算定するシステム(以下「送電容量算定システム」)の開発が行われている[6]。

本論文は、上述の送電容量算定システムにより測定される管路内温度、負荷電流等のデータの履歴から、ホットスポットにおける土壌の熱抵抗・熱容量を詳細モデル上で推定し、事故発生や作業停止等に起因する一時的な負荷の急増に対する短時間送電容量のリアルタイム計算を行う基本

Wc:導体損失 Wd:誘電体損失 Ws:シース損失

Tc:導体温度 Ti:絶縁体温度 Ts:シース温度 Tv:防食層温度 Td:管路内温度 Te:土壌温度 Tb:基底温度

Ri:絶縁体熱抵抗 Rv:防食層熱抵抗 Rs:表面放散熱抵抗 Rg1,Rg2:土壌熱抵抗

Cc:導体熱容量 Ci:絶縁体熱容量 Cs:シース熱容量 Cv:防食層熱容量 Cg1,Cg2:土壌熱容量

図1 ケーブル、土壌部の熱的近似モデル

Fig.1. Thermal approximate model of cable and soil

アルゴリズムについて、別途実施した66kV 3心OFケーブルの通電試験結果をもとに理論的な検討を行う。

なお、数理計画の分野においては、既存の手法では求解が困難とされてきた様々な最適化問題に対して遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm [7]) による解法が実現されているが、本論文ではこれを土壌の熱抵抗・熱容量の推定に用いることで、これまでに達成されなかったより正確な推定を可能とした[8]。

2. ケーブル・土壌部の熱的近似モデル

ケーブル・土壌部の過渡温度変化を表す熱的近似モデルについては、従来から、ケーブル・土壌各部の熱抵抗・熱容量を多数組み合わせ合わせたCR多段回路が用いられてきた[1]。特に土壌部の近似モデルについては過去様々なものが提案されており、文献[9][10]ではCR3段回路を用いることで土壌部の過渡温度変化を正確に模擬できることが示されている。しかし、この3段のCR回路のうち最も時定数の大きなものは1,000～2,000日とされており、本論文で扱う短時間送電容量(30分～6時間)に対しては、これを取り除いて考えても差し支えない。そこで、本論文では土壌部をCR2段で近似するモデル(図1)をもとに以降の検討を行う。ここで、土壌部の熱抵抗・熱容量(Rg1,Rg2,Cg1,Cg2)は時変かつ未知なパラメータである。本モデルにおいて、ケーブル各部の温度(Tc,Ti,Ts,Tv)、管路内温度(Td)、土壌温度(Te)は基底温度(Tb)を基準温度として、次の(1)～(6)式の連立微分方程式により与えられる。

$$C_c \frac{d(T_c - T_b)}{dt} + \frac{T_c - T_i}{0.5R_i} = W_c \quad (1)$$

$$C_i \frac{d(T_i - T_b)}{dt} + \frac{T_i - T_s}{0.5R_i} = \frac{T_c - T_i}{0.5R_i} + W_d \quad (2)$$

$$C_s \frac{d(T_s - T_b)}{dt} + \frac{T_s - T_v}{0.5R_v} = \frac{T_i - T_s}{0.5R_i} + W_s \quad (3)$$

$$C_v \frac{d(T_v - T_b)}{dt} + \frac{T_v - T_d}{0.5R_v + R_s} = \frac{T_s - T_v}{0.5R_v} \quad (4)$$

$$C_{g1} \frac{d(T_d - T_b)}{dt} + \frac{T_d - T_e}{R_{g1}} = \frac{T_v - T_d}{0.5R_v + R_s} \quad (5)$$

$$C_{g2} \frac{d(T_e - T_b)}{dt} + \frac{T_e - T_b}{R_{g2}} = \frac{T_d - T_e}{R_{g1}} \quad (6)$$

3. 光ファイバー分布型温度センサを用いた送電容量算定システム[6]

この送電容量算定システムは、ケーブル布設管路内に通線・配置した光ファイバー分布型温度センサにより、時々刻々変化する管路内温度を測定するとともに、別途配置したケーブル電流測定用CT、基底温度測定用熱電対から負荷電流、基底温度を測定し、管路内温度の監視ならびに常時送電容量を算定する総合システムである。特に、光ファイバー分布型温度センサはケーブル長手方向の温度を測定することができるため、当該線路のホットスポットを正確かつ容易に同定することを可能とした。本論文の以降の検討は同定されたホットスポットに関するものとして行う。このシステムに必要なデータ項目と図1中の各定数・変数との関係を表1に示す。ここで、基底温度はケーブル発熱の影響を受けない十分遠方における、ケーブル埋設深さと同じ深さの温度を測定している。

4. 通電試験の概要ならびに結果

66kV 3心OFケーブルの通電試験[6]の設備仕様を表2に示す。通電試験では、低負荷状態(80(A)程度)から高負荷状態(160(A)程度)へとベース負荷を増加させた上で、1日6時間にわたりインパルス的な負荷電流(最大230(A)程度)を印加し、管路内の温度変化の過渡特性を観測した。試験データの一例を図2に示す。

管路内温度(Td)の測定データにおけるノイズを除去するため、移動平均法による雑音除去処理((7)式)を施す。なお、本論文では雑音除去後のデータを測定データとする。

図2 通電試験結果

Fig.2. Result of charging experiment

$$T_d(k) = \frac{1}{2m+1} \sum_{i=-m}^m T_d(k+i) \quad (m=3) \quad (7)$$

表1 必要とされるデータ項目と各定数・変数

Table 1. Required data items, constants and variables

データ項目	既/未知	定数・変数の説明
熱抵抗	既知	$R_i, R_v, R_s, C_c, C_i, C_s, C_v$ (ケーブル内部)
熱容量	未知	$R_{g1}, R_{g2}, C_{g1}, C_{g2}$ (土壌部)
各部温度	既知	T_d (光ファイバー分布型温度センサにより30分毎に測定) T_b (基底温度測定用熱電対により30分毎に測定)
	未知	T_c, T_i, T_s, T_v, T_e
熱損失	既知	W_c, W_s (ケーブル電流測定用CTにより30分毎に測定した負荷電流 I から算出), W_d (定数)

表2 試験設備仕様

Table 2. Content of experiment facility

項目	仕様、内容
通電用ケーブル	66kV 3×80mm ² OFAZE
管路寸法	埋設深さ 2500mm 管路長 70m 管路内径 150mm

5. ケーブル・土壌各部の温度推定

本論文で提案する短時間送電容量リアルタイム計算においては、土壌のパラメーター($R_{g1}, R_{g2}, C_{g1}, C_{g2}$)、ならびにケーブル・土壌各部の温度を正確に推定することが必要である。本節では土壌のパラメーターが既知のもとでのケーブル・土壌各部の温度推定法について述べる。なお、土壌

のパラメーター推定法については次節で取り上げる。

ケーブル内部の温度推定 (T_c, T_i, T_s, T_v) については、測定データ (I, T_d, T_b) から、(1)~(4)式を差分近似して解くことにより得ることが可能である[11]。ここで、各部の温度の初期値が未知であっても、最大約6時間程度の数値計算で真値に追従することが示されている。しかしながら、気中布設ケーブルを対象として検討されたこの方法では(1)~(4)式しか考慮されないため、(5),(6)式に現れる土壌温度 (T_e) の情報を得ることはできない。

一方、制御工学の分野では、限られた状態量だけを測定しながら、測定不可能な状態量を推定するオブザーバー(状態観測器)が広く用いられている[12]。

そこで、本論文では本問題にオブザーバーを用いることで、各部の温度の初期値が未知であっても、土壌温度(T_e)を含めた系全体の温度推定が可能なことに着目し、下記に示すオブザーバーを構成する。

<5.1> オブザーバーの定式化

(1)~(6)式を状態空間表示((8),(9)式)で表す。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (8)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \quad (9)$$

ここで、

$$\mathbf{x} = [T_c - T_b \quad T_i - T_b \quad T_s - T_b \quad T_v - T_b \quad T_d - T_b \quad T_e - T_b]^T$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{2}{R_i C_i} & \frac{2}{R_i C_i} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2}{R_i C_i} & -\frac{4}{R_i C_i} & \frac{2}{R_i C_i} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2}{R_i C_i} & \left(\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_v}\right) \frac{-2}{C_i} & \frac{2}{R_v C_s} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{R_v C_v} & \left(\frac{1}{R_v} + \frac{1}{R_v + 2R_s}\right) \frac{-2}{C_v} & \frac{2}{(R_v + 2R_s) C_v} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2}{(R_v + 2R_s) C_{g1}} & \left(\frac{2}{R_v + 2R_s} + \frac{1}{R_{g1}}\right) \frac{-1}{C_{g1}} & \frac{1}{R_{g1} C_{g1}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_{g1} C_{g2}} & \left(\frac{1}{R_{g1}} + \frac{1}{R_{g2}}\right) \frac{-1}{C_{g2}} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_c} & 0 & \frac{0.0272}{C_c} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_i} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad C = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0] \quad u = \begin{bmatrix} W_c \\ W_d \end{bmatrix}$$

各部の温度の推定値を

$$\hat{x} = [\hat{T}_c - T_b \ \hat{T}_i - T_b \ \hat{T}_s - T_b \ \hat{T}_v - T_b \ \hat{T}_d - T_b \ \hat{T}_e - T_b]^T$$

とし、(8),(9)式に管路内温度の測定値と推定値の誤差をフィードバックした項を付加したオブザーバーを(10),(11)式の様に構成する。

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - C\hat{x}) \quad (10)$$

$$y = Cx \quad (11)$$

(10),(11)式においてゲイン行列 L を適切に選定し[13]、同式を差分近似して解くことで、各部の温度の初期値が未知であっても、系全体の正確な温度推定が可能となる。

<5.2> オブザーバー適用例

図3に(10),(11)式により系全体の温度推定を行った数値計算例を示す。同図には全系の温度のうち、導体温度($\hat{T}_c$)、土壤温度($\hat{T}_e$)を代表例として示した。なお、今回の通電試験では導体温度(T_c)の測定は行っており、また土壤温度(T_e)は元来測定可能な温度ではないが、通電開始前のケーブル・土壤各部の温度は基底温度(T_b)に等しいことから、これを初期値として(1)~(6)式を解いたものを同図中に導体温度 T_c (計算)曲線、土壤温度 T_e (計算)曲線として示した。更に、導体損失(W_c)、シース損失(W_s)の算出には同図中に示す負荷電流(I)を用いた。同図より、初期値が未知であっても、推定開始後約2~3時間程度で正確な導体温度($\hat{T}_c$)、土壤温度($\hat{T}_e$)の推定が可能であることがわかる。

6. 遺伝的アルゴリズムを用いたパラメーター推定

前節で述べた通り、提案する短時間送電容量リアルタイム計算においては、土壤のパラメーターを正確に推定することが必要である。土壤のパラメーターは季節変化を中心とした時変パラメーターであることが知られており、その変化を時々刻々把握しなければならない。本節では、土壤のパラメーターを過去一定期間にわたる測定データ(I, T_d, T_b)の履歴を用いて推定するアルゴリズムについて述べる。なお、本問題の未知パラメーターを解析的(例えば最小二乗法)に求めようとすると、いわゆる悪条件(ill-condition)に陥り、求解が困難となる。そこで、本論文では未知パラメーターを試行錯誤的に求める遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm: 以下GAと略記)[7]を用いた。

GAを用いたパラメーター推定は、乱数により $Rg1, Rg2, Cg1, Cg2$ の組を多数発生させ、各々に対し(8),(9)式から管路内温度の理論値($\hat{T}_d$)を計算し、測定値(T_d)との誤差の少ない組を選び出すという流れをベースとしている。この際の評価関数は試行錯誤を繰り返して(12)式のとおり設定した。

$$f = \frac{1}{\left(\sum_{k=1}^n |T_d(k) - \hat{T}_d(k)| \right)^{10}} \quad (n: \text{全データ数}) \quad (12)$$

なお、(8),(9)式を解く上で各部の初期温度が必要となるが、その直前3時間についてオブザーバーを用いた(10),(11)式を解くことで、初期温度推定を行うことができる。以下にGAを用いたパラメーター推定手法の詳細を示す(図4参照)。

各部温度の初期値: $\hat{T}_c(0) = \hat{T}_i(0) = \hat{T}_s(0) = \hat{T}_v(0) = T_d(0)$ ($T_d(0) = 28.6(^{\circ}\text{C})$)

$\hat{T}_e(0) = T_b(0)$ ($T_b(0) = 16.2(^{\circ}\text{C})$)

オブザーバーゲイン: $L = [2.08 \ 1.72 \ 1.22 \ 1.09 \ 1.00 \ 0.96]^T$

土壤のパラメーター: $Rg1=22, Rg2=35, Cg1=150, Cg2=10,000$

図3 オブザーバー適用例

Fig.3. Numerical example of observer application

- ① 乱数により、 $Rg1, Rg2, Cg1, Cg2$ の組(個体)を N 組(人口数)発生させる。(第1世代)
- ② 各組に対して、パラメーター推定開始直前3時間の測定データ(I, T_d, T_b)を用い、任意の初期値(本論文では $\hat{T}_c(0)=\hat{T}_i(0)=\hat{T}_s(0)=\hat{T}_v(0)=T_d(0)$, $\hat{T}_c(0)=T_b(0)$)から(10),(11)式を解き、パラメーター推定開始時におけるケーブル・土壤各部の初期温度推定値を求める。
- ③ 各組に対して、②で求めた各部の初期温度推定値をもとに、パラメーター推定期間中の30分毎の管路内温度の理論値($\hat{T}_d$)を、測定データ(I, T_b)を用いて(8),(9)式により算出する。算出した理論値に対して評価関数((12)式)を計算する。
- ④ ②～③を N 組繰り返す。
- ⑤ 評価関数の値の高い(測定値と理論値の誤差の少ない)組をその数を増やしながらか次世代に残し、低い組を切り捨てる(自然淘汰)とともに、ある確率で新たな組を生成(交差、突然変異)する。
- ⑥ ②～⑤を M 回(世代数)繰り返す。
- ⑦ M 回目に残った N 組のうち、最も評価関数の値の高い組を近似解とする。

図4 GAによるパラメーター推定のフローチャート
Fig.4. Flowchart of GA based parameter estimation

7. シミュレーション例

図2中に示す試験データをもとに、通電試験開始後1日～6日(5日間)のパラメーター推定を行った。GAの適用に際し、未知パラメーターを上・下限を有した離散値で表現(ストリング表現)する必要があるが、本論文では、上・下限を工学的経験をもとに試行錯誤的に定め、また離散幅はパラメーター推定の精度に影響がない範囲で大きく取って収束性を高めた。その具体例を表3に示す。またGAの諸元(人口数、世代数、交差確率、突然変異発生確率)についても試行錯誤を繰り返して表4の通り設定した。この結果得られたパラメーター推定値を表5に示す。

表3 未知パラメーターのストリング表現

パラメータ	ストリング長	下限～上限	離散幅
Rg1	5	10～42	1
Rg2	4	10～90	5
Cg1	5	10～330	10
Cg2	5	1,000～33,000	1,000

表4 GAの諸元

項目	設定値
人口数	50
世代数	50
交差確率	0.6
突然変異発生確率	0.01

表5 パラメーター推定結果

パラメーター	推定値
Rg1 (°C·cm/w)	22
Rg2 (°C·cm/w)	35
Cg1 (J/°C·cm)	150
Cg2 (J/°C·cm)	10,000

表5に示すパラメーター推定値による管路内温度の理論曲線((8),(9)式より算出)を図5に示す。図5において測定値と理論値の平均誤差は約0.58(°C)、最大誤差は約2.20(°C)であり、提案した熱的近似モデル、パラメーター推定手法は妥当であると考えられる。

なお、電力設備の保守・運用の観点からは平均誤差の精度は勿論、特に最大誤差の精度が重要となる。例えば、推定パラメーターによる管路内温度の理論値が測定値より2.20(°C)低く推定された場合、導体温度も真値より最大2.20(°C)低く推定され、その結果、短時間送電容量を危険側に算出してしまふ恐れがある。パラメー

図5 推定パラメーターによる管路内温度理論曲線
Fig.5. GA estimation based theoretical curve of duct temperature

ターの推定精度に関する詳細な評価は今後予定している長期的な実証試験において再度確認することが必要であるが、例えば短時間送電容量を算出する際の導体の最大許容温度を3(°C)程度低く設定するなどの方策で対応することが望ましいと考えられる。

8. 短時間送電容量リアルタイム計算

前述したケーブル・土壤各部の温度推定手法、土壤のパラメーター推定手法、ならびに測定データ(I, T_b)を用いることで、当該線路の布設・運用状況を考慮に入れた短時間送電容量リアルタイム計算が可能となる。短時間送電容量の計算は、ある負荷電流が流れたと仮定した場合の導体の温度上昇を(8),(9)式により計算することがベースとなる。(8),(9)式を解く上で各部の初期温度が必要となるが、直前3時間についてオブザーバーを用いた(10),(11)式を解くことで、正確な初期温度推定を行うことができる。以下に短時間送電容量リアルタイム計算手法の詳細を示す。(図6参照)

- ① 短時間送電容量計算時の直前3時間の測定データ(I, T_d, T_b)、ならびにパラメーター推定値を用いて、任意の初期値(本論文では $\hat{T}_c(0) = \hat{T}_i(0) = \hat{T}_s(0) = \hat{T}_v(0) = T_d(0), \hat{T}_s(0) = T_b(0)$)から(10),(11)式を解き、短時間送電容量計算時におけるケーブル・土壤各部の正確な初期温度推定値を求める。
- ② 過負荷通電時間(30(分),1(時間),2(時間),4(時間),6(時間)のいずれか)を選択する。
- ③ 過負荷通電電流値を設定する。
- ④ ①で求めた各部の初期温度推定値をもとに、③の過負荷通電電流に対する導体温度(T_c)の過渡温度上昇を(8),(9)式から求める。
- ⑤ 導体温度が最高許容温度を越えなければ、電流値を

1(A)増加させて④を繰り返す。

⑥ 導体温度が最高許容温度を越えれば、直前の電流値を短時間送電容量とする。

⑦ ②にて別の過負荷通電時間を選び、③～⑥を繰り返す。

⑧ 30(分),1(時間),2(時間),4(時間),6(時間)に対する短時間送電容量が算出される。

図6 短時間送電容量計算手法
Fig.6. Method of calculating short-time thermal capacity

図7に、通電試験開始6日目の各時刻(30分毎)における、過負荷通電時間30(分),1(時間),2(時間),4(時間),6(時間)に対する短時間送電容量の計算結果を示す。なお、算出にあたり導体の最高許容温度を90(°C)とし、過負荷前の負荷

図7 短時間送電容量リアルタイム計算結果
Fig.7. Result of real-time rating of short-time thermal capacity

表6 短時間送電容量リアルタイム計算結果の一例
Table 6. An example of real-time rating of short-time thermal capacity 単位:A

			過 負 荷 通 電 時 間				
			30(分)	1(時間)	2(時間)	4(時間)	6(時間)
各時刻における 提案手法による 短時間送電容量	時 刻	0:00	433	369	321	290	280
		6:00	444	377	327	296	286
		12:00	410	354	312	285	276
		16:00	379 (366 *1)	336 (326)	304 (297)	285 (280)	278 (274)
		18:00	405	352	313	289	282
		24:00	431	367	320	290	280
JCSによる短時間送電容量*2			325	286	266	256	254

*1 ()内: 導体の最高許容温度を87(°C)と設定した場合の短時間送電容量
*2 過負荷前の負荷電流として、常時許容電流の100% (230A、Lf=0.6) を想定 [Lf:線路損失率]

表7 提案手法とJCSによる短時間送電容量の比較
Table 7. Comparison between JCS and proposed methods

項目	JCS	提案手法
近似回路	CR2段近似 (ケーブル、土壤部を独立なCR回路で表現)	CR6段近似 (図1参照)
土壤熱抵抗・熱容量	熱抵抗:別途計算式より算出 (本実験線路では67(°C・cm/w)) 熱容量: $\tau = 33(\text{hours})$ となるよう設定	熱抵抗・容量:推定 (表3参照)
基底温度	固定値 (通常は25(°C))	測定値 (前節の例では約16(°C))
初期電流	固定値 (通常は常時許容電流の100(%))	測定値 (前節の例では常時許容電流の約70%~100%)

電流(I)・管路内温度(Td)(短時間送電容量算定時の初期値)は同図中に示す値を用いた。また、未知パラメータの推定期間は短時間送電容量計算時の直前5日間とした。

表6に0:00, 6:00, 12:00, 16:00, 18:00, 24:00における短時間送電容量(図7より抜粋)、JCSに基づく従来の短時間送電容量算定手法による計算値を示す。同表より30(分)容量で50(A)~120(A)、6(時間)容量で20(A)~30(A)程度の短時間送電容量の増量が可能であることがわかる。また、土壤のパラメータの推定誤差により短時間送電容量が危険側に算出されることを回避する一対策として、導体の最高許容温度を87(℃)として算出した16:00現在における短時間送電容量を同表中に併せて示す。短時間送電容量は導体の最高許容温度を90(℃)として算出したものより若干抑えられるものの、JCSによる算出結果より増量が可能であることがわかる。

表7に提案手法とJCSによる手法との比較を示す。提案手法は、当該線路における土壤の熱抵抗・熱容量の推定値を短時間送電容量計算に用いている他、基底温度、初期電流についても測定値を用いることで、当該線路の布設・運用状況を考慮した短時間送電容量の算定を可能にしている。

9. まとめ

光ファイバー分布型温度センサを用いた送電容量算定システムにより測定される管路内温度、負荷電流、基底温度の履歴から、時々刻々変化する土壤の熱抵抗・熱容量を推定し、短時間送電容量のリアルタイム計算を行う基本アルゴリズムについて提案した。

提案アルゴリズムでは、オブザーバーを用いることで、ケーブル・土壤各部の温度の初期値が未知であっても、土壤温度(Te)を含めた系全体の正確な温度推定を可能とした。さらに土壤の熱抵抗・熱容量の推定に遺伝的アルゴリズムを用いることで、数値解析的な困難を解決し、精度の高い推定を実現した。その結果、従来の短時間送電容量算定手法に比べて送電容量の増量が可能であることを示した。

本アルゴリズムは土壤の熱抵抗・熱容量を過去の測定データ(I, Td, Tb)の履歴から推定しており、ケーブルの布設状況(ケーブル種類、埋設深さ、土質等)・運用状況(負荷状況、運転年数等)に関わらず適用が可能である。また、土壤の熱抵抗・熱容量を通年にわたって推定・蓄積することで、常時送電容量の詳細設計に用いることも可能である。

今後は実稼動設備での長期的な実証試験を行い、土壤のパラメータの推定精度に関する詳細な検討を含めた提案アルゴリズムの実運用上での有効性を検証するとともに、長期間にわたる土壤の熱抵抗・熱容量のデータの蓄積を図る予定である。

最後に技術指導、ならびに貴重なデータを与えていただいた東北電力株式会社、株式会社フジクラ殿に深く感謝致します。

(平成6年10月25日受付、平成7年1月27日再受付)

- [1] J. H. Neher : "The transient temperature rise of buried cable systems", IEEE Trans, Vol.PAS-83, pp.102-114, Feb., 1964
- [2] (社)日本電線工業会 : "電力ケーブルの許容電流(その1)", JCS 第168号D (1980)
- [3] R. J. Nelson, T. F. Brennan & J. S. Engelhardt : "The application of real-time monitoring and rating to HPOF pipe cable systems", IEEE Trans on Power Delivery, Vol.4 No.2, pp.850-856, 1989
- [4] J. B. Prime, J. G. Valdes : "System to monitor the conductor temperature of underground cables", IEEE Trans, Vol.PAS-100, pp.143-153, Jan., 1981
- [5] 戸崎・加藤・稲田・塩田・和田・高橋・澤栗 : "光ファイバのラマン散乱特性と分布型温度センサ", フジクラ技報, No.76, 1989
- [6] 佐々木・飯沼・平野・平田・佐伯・松浦 : "光ファイバー分布型温度センサを用いたケーブル送電容量算定システムの開発", 電気学会全国大会, No.1584, 1994
- [7] 例えば D. E. Goldberg : "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning", Addison-Wesley, 1989
- [8] 坂田・岩本 : "地中ケーブル線路の送電容量オンライン計算による系統運用支援システムの基礎的検討", 電気学会 電力・エネルギー部門大会, No.501, 1994
- [9] 倉田・川崎・中村 : "内部水冷CVケーブルの許容電流の計算", 電気学会論文誌B, 108巻9号, pp.407-414, 1988
- [10] 中挟・内田・清野・一柳・井上・柴田・岩田 : "洞道温度の計算方法", 電気学会全国大会, No.1384, 1985
- [11] 中村・諸岡・川崎 : "地中電力ケーブルの導体温度監視方法の検討", 電気学会論文誌B, 110巻7号, pp.609-618, 1990
- [12] 例えば 小郷・美多 : "システム制御理論入門", 実教出版
- [13] "The Student Edition of MATLAB", The Math Works Inc., 1992

坂田 学 (正員) 昭和37年2月21日生。61年3月早稲田大学理工学部電気工学科卒業。同年4月 東北電力(株)入社。主として送電線の保守・計画業務に従事。平成5年4月~平成7年3月 同社工務部送電課付にて早稲田大学理工学研究科修士課程在籍。

岩本 伸一 (正員) 昭和23年1月25日生。46年早稲田大学理工学部電気工学科卒業。49年アメリカ・クラークソン大学大学院修士課程修了。53年3月早稲田大学大学院博士課程修了。工学博士。同年4月東海大学工学部専任講師、56年同助教授。57年早稲田大学理工学部助教授、61年同教授、現在に至る。平成4年~5年アメリカ・ワシントン大学客員教授。電力系統工学、特に潮流計算、過渡安定度、AI応用の研究に従事。