

平成 30 年度

学士学位論文

差分進化法を用いた
超伝導変圧器の機器定数推定

村岡 樹

(学籍番号 : 15232084)

九州工業大学 情報工学部

電子情報工学科

指導教員 : 小田部 荘司 教授

平成 31 年 2 月 18 日

目次

第 1 章	序論.....	1
1.1	はじめに.....	1
1.2	研究背景.....	2
1.3	本稿における解析系統.....	3
1.4	変圧器の簡易磁気飽和特性と回路方程式.....	4
1.5	常微分方程式の計算手法.....	7
1.6	差分進化法.....	7
1.7	遺伝的アルゴリズム.....	10
1.8	先行研究.....	11
1.9	本研究の目的.....	12
第 2 章	推定手法.....	13
2.1	計算手法.....	13
2.2	計算環境.....	14
第 3 章	結果及び考察.....	15
3.1	差分進化法と遺伝的アルゴリズムの比較.....	15
3.2	差分進化法の制御パラメータ.....	17
3.3	最適ルンゲ・クッタ法の時間刻み幅 Δt	20
3.4	1 波形のみ計算.....	22
3.5	世代数とスケールリングファクター F	23
3.6	世代数と交叉率 CR	27
3.7	親ベクトルを常に最良の個体に固定した場合.....	29
第 4 章	結論.....	31
	参考文献.....	32

謝辞.....	33
---------	----

目次

Fig. 1.1 : 超伝導転移温度最高記録の変位.....	2
Fig. 1.2 : 系統の解析モデル[1].....	3
Fig. 1.3 : 単相超伝導変圧器に対する等価回路[1].....	4
Fig. 1.4 : $i-\phi$ 磁気特性.....	4
Fig. 1.5 : $i-\phi$ 簡易磁気特性.....	6
Fig. 1.6 : $\phi-L$ 特性[1].....	6
Fig. 1.7 : DE の概略図[4].....	8
Fig. 1.8 : DE の探索初期[4].....	9
Fig. 1.9 : DE の探索中盤[4].....	9
Fig. 1.10 : GA により求めた機器定数.....	11
Fig. 1.11 : GA により求めた励磁投入電流波形.....	12
Fig. 2.1 : 測定波形.....	13
Fig. 3.1 : DE によって求めた励磁突入電流波形.....	16
Fig. 3.2 : DE と遺伝的アルゴリズムの評価関数の値の変化.....	16
Fig. 3.3 : DE によって求めた機器定数.....	17
Fig. 3.4 : スケーリングファクター F による評価関数の値の変化.....	18
Fig. 3.5 : 交叉率 CR による評価関数の変化.....	19
Fig. 3.6 : F 、 CR をそれぞれ変化させた場合の評価関数の変化.....	19
Fig. 3.7 : 時間刻み幅の変化による評価関数の変化.....	21
Fig. 3.8 : 時間刻み幅を変化させたときの波形.....	21
Fig. 3.9 : DE による計算を1波形のみ行った場合の励磁突入電流波形.....	22
Fig. 3.10 : DE による計算を1波形のみ行った場合の励磁突入電流波形.....	23
Fig. 3.11 : 10000 世代まで計算を行った場合の評価関数の変化.....	24
Fig. 3.12 : $F = 0.6$ から4000 世代で $F = 0.2$ に変化させたときの評価関数の変化...	25

Fig. 3.13 : $F = 0.6$ から 4000 世代で $F = 1.0$ に変化させたときの評価関数の変化...	25
Fig. 3.14 : $F = 0.2$ から 4000 世代で $F = 1.0$ に変化させたときの評価関数の変化...	26
Fig. 3.15 : 様々な CR を用いて計算を行った場合の評価関数の変化.....	28
Fig. 3.16 : $CR = 0.8$ から 5000 世代で $CR = 0.2$ に変化させた場合の評価関数の変化	28
Fig. 3.17 : F 、 CR をそれぞれ変化させた場合の評価関数の変化 (DE/best/1/bin) .	30
Fig. 3.18 : DE/best/1/bin で求めた機器定数	30

表目次

Table 1.1 : GA により得られた最も評価の良い機器定数.....	11
Table 2.1 : 解候補群の探索範囲	14
Table 2.2 : 計算環境.....	14
Table 3.1 : DE による機器定数推定の結果.....	15
Table 3.2 : GA と DE の評価関数と処理時間の比較	15
Table 3.3 : 機器定数を固定し時間刻み幅 Δt を変化させた場合の評価関数 d の変化	20

第1章 序論

1.1 はじめに

1911年オランダの物理学者オネンスが、水銀の電気抵抗が4.2 K以下で消失することを発見した。これが超伝導現象の初の発見である。1933年にはドイツのマイスナーとオクセンフィールドが超伝導体に強い反磁性があることを明らかにした。これがいわゆるマイスナー効果である。1957年、超伝導の仕組みを解明したのはアメリカの物理学者バーディーン、クーパー、シュリファーであった。その理論を3人の頭文字を取ってBCS理論と呼ぶ。BCS理論は超伝導を量子力学の現象として扱い量子現象のマクロレベルでの出現という超伝導の本質を説明した。しかし、BCS理論の枠内では臨界温度は40 Kを超えないという予測も導き出された。臨界温度とは超伝導現象を示さなくなる温度のことである。この後、約30年間臨界温度40 Kを超える超伝導体は発見されなかった。しかし1986年、ドイツの物理学者ベトノルツ、スイスの物理学者ミュラーにより銅による酸化物が臨界温度30 Kを示し、世界中で銅酸化物の超伝導体の研究が勧められた。その3か月後に臨界温度92 KのY系銅酸化物の超伝導体が発見された。さらに、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ によって液体窒素(77 K)での超伝導実験が可能になった。1988年には臨界温度100 Kを超えるBi-Sr-Ca-Cu-O系の超伝導体が発見されている。

Fig. 1.1からも分かるように超伝導体の臨界温度が液体窒素の沸点より高い温度で実現されたことなどから現在、主に線材としての応用が期待されている。超伝導体は電気抵抗が0 Ωという特徴があり、エネルギーの損失なく大電流を流すことが可能なためである。また、医療現場で使用されているMRI(Magnetic Resonance Imaging、磁気共鳴画像)やリニアモーターカー、電力・エネルギー分野での運用が期待されているSMES(Superconductive Magnetic Energy Storage、超伝導エネルギー貯蔵装置)、SQUID(Superconductive Magnetic Energy Storage、超伝導量子干渉装置)といった高感度センサーなど様々な分野での応用が期待されている。

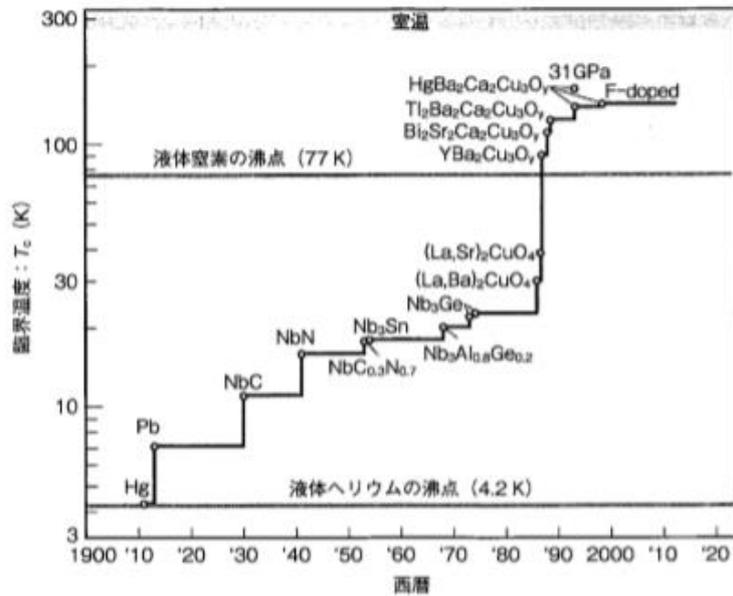


Fig. 1.1 : 超伝導転移温度最高記録の変位

1.2 研究背景

現在の電力系統において使用している変圧器を電力系統へ投入する際励磁突入電流が発生し、他の電力系統の電力品質に影響を与えている。これらの影響には、渦電流などの発生によって伴う保護リレーの不要動作、瞬時電圧低下による制御装置の誤作動、照明などのちらつき、消灯などが。これらの影響について把握、対策を検討するには任意の投入条件の励磁突入電流発生時の挙動を解析できることが必要となる。解析に必要な機器定数のうち、定格磁束密度や空心インダクタンスは励磁突入電流の大きさを左右するものでありながら、変圧器の設計に密にかかわる値であることから、系統運用や設備運用において解析を行う場合入手が困難となる場合が生じている。また、現在超伝導変圧器は特に短絡電流等による巻線部分でのクエンチ時の送電停止が問題となっており実用化はまだ実現されていないが、将来的に実用化が期待されている。超伝導現象では先述したように電気抵抗が 0Ω になることから、変圧器の巻線に超伝導体を用いることによって巻線部分での損失が非常に小さくなり、エネルギー効率を向上させることができ、また、エネルギー損失が小さくなることで電気装荷が大きくなり、さらに鉄心の断面積を小さくすることによって小型化・軽量化が可能になるなどの利点がある。将来超伝導変圧器が電力系統に導入される場合にも、常伝導変圧器と基本原理は同じであるため、解析に必要な機器定数が入手困難になる状況が生じると考えられる。

また一方で、電力系統の電力品質に与える影響の原因となっている変圧器の励磁突入電流のみを測定できる場合がある。変圧器高圧側には計器用変流器が設置されており、その出力回路にクランプを使用することにより非接触で測定できるからである。この様

な場合、逆に励磁突入電流から変圧器の機器定数推定と投入条件の値が推定できる。これまでの研究では電力系統で超伝導変圧器を運転する場合にも系統運用における解析検討が円滑に行えるよう最適レンゲ・クッタ法と遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm, GA)を組み合わせた推定方法を構成し、単相の Bi-2223 線材による超伝導変圧器の機器定数推定が行われている。

そこで本稿では、上記で述べた最適レンゲ・クッタ法と GA を組み合わせた推定方法とは別に、最適レンゲ・クッタ法と差分進化法(Differential Evolution, DE)を組み合わせた推定方法で機器定数推定を試みた。その結果を比較・考察していく。

1.3 本稿における解析系統

本解析方法では Fig. 1.2 に示す単線結線図の系統を解析モデルとする。上位系統は 1 電源、1 回線の送電線で構成されている。解析対象の変圧器を高圧側から系統へ投入するとし、低圧側に接続した開閉器は常時解放されている。実際の設備では、変圧器の低圧側母線にコンデンサ、所内変圧器、避雷器などの機器が常時接続されている場合があるが、簡易に解析ができるように Fig. 1.2 のモデルに固定した。解析で求める電流は Fig. 1.2 の電流計での瞬時値とした。Fig. 1.2 の系統において対象とした単相の超伝導変圧器の等価回路を Fig. 1.3 に示す。対象の変圧器は励磁突入電流に対してクエンチしないことから、巻き線抵抗は 0Ω とした。また、磁気特性は本来 Fig. 1.4 の様にヒステリシス曲線を描くが、鉄心の抵抗成分は無視できるほど十分に大きいことから、損失成分は無視し、磁気飽和特性を反映したインダクタンスの部分だけを扱うようにした。Fig. 1.3 において計算に必要な系統、機器定数は以下のとおりである。

- ・ R_B, L_B : 上位系統のインピーダンス
- ・ $L_{c1} = \frac{L_c}{2}$: 高圧側の漏れインダクタンス
- ・ L_c : 変圧器の漏れインダクタンス
- ・ L_L : 励磁飽和特性を反映した励磁インダクタンス

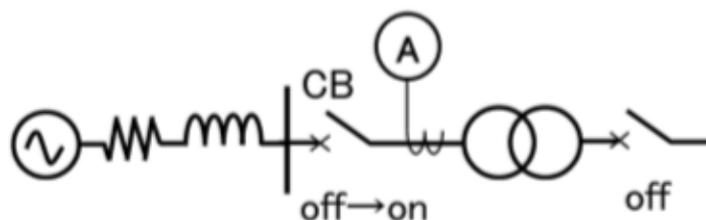


Fig. 1.2 : 系統の解析モデル[1]

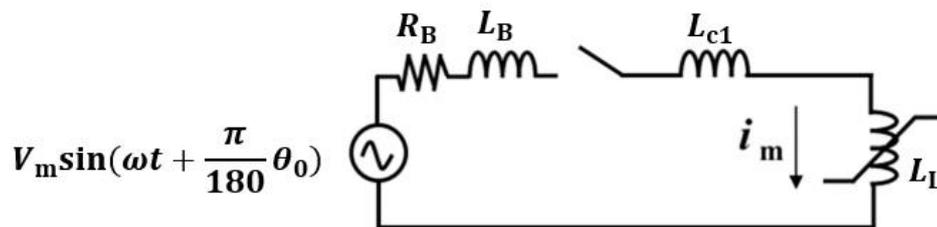


Fig. 1.3 : 単相超伝導変圧器に対する等価回路[1]

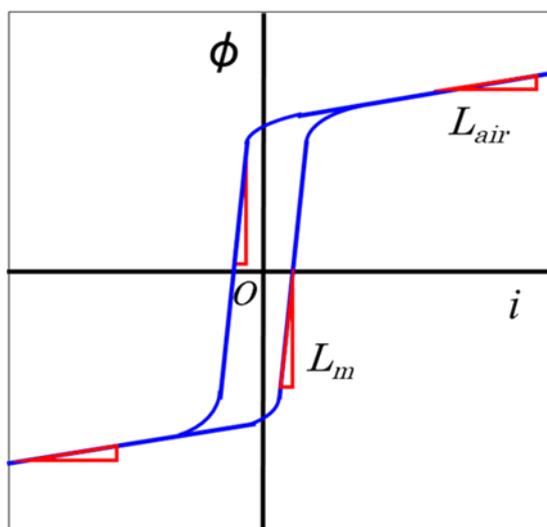


Fig. 1.4 : i - ϕ 磁気特性

1.4 変圧器の簡易磁気飽和特性と回路方程式

Fig. 1.3 の等価回路における L_L は定格運転時の非飽和時には励磁インダクタンス L_m 、飽和時には励磁インダクタンスとして考えられる巻き線だけの自己インダクタンス、すなわち空心インダクタンス L_{air} を取る。その様子を Fig. 1.5 に示す。その値は各部分で $\frac{d\phi}{dt}$ となり、ほぼ一定と考えてよい。そこで最適ルンゲ・クッタ法では、各相の磁束 ϕ の変化に対して階段状に励磁インダクタンス L_L が変化する簡易磁気飽和特性を用いた。この特性を Fig. 1.6 に示す。Fig. 1.6 から分かるように L_m 、 L_{air} の値は非飽和時、飽和時のそれぞれの時間帯において一定の値を取る。以上のことを踏まえ、回路方程式を式(1.1)から(1.3)で表す。

$$L_k \frac{di_m}{dt} + R_A i_m = V(t) \quad (1.1)$$

$$V(t) = V_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{180} \theta_0\right) \quad (1.2)$$

$$\frac{di_m}{dt} = \{V(t) - R_A i_m\} / L_k \quad (1.3)$$

ここで、Fig. 1.3 の場合、回路の全抵抗 R_A 、全インダクタンス L_K はそれぞれ $R_A = R_B$ 、 $L_K = \frac{L_B + L_{c1} + L_L}{1000}$ になる。 L_L は磁気飽和特性を表す励磁インダクタンス、 V_m は電源電圧の波高値、 θ_0 は電圧投入位相である。また、 ω については $\omega = 2\pi f_e$ で与えられ、 f_e は電源電圧の周波数である。

磁束 ϕ は式(1.1)を変形して式(1.4)から得られ、 L_L については式(1.5)、(1.6)から求めることができる。

$$\phi = \int V(t) dt - R_A \int i_m dt \quad (1.4)$$

$$L_L = \begin{cases} L_m & (|\phi| \leq \phi_{\max}) \\ L_{\text{air}} & (\phi_{\max} > |\phi|) \end{cases} \quad (1.5)$$

$$\phi_{\max} = \phi_n \left(\frac{B_s}{B_n} \right) \quad (1.6)$$

ここで ϕ_{\max} は飽和磁束値、 B_n は変圧器の定格磁束密度、 B_s は飽和磁束密度、 ϕ_n は定格磁束密度である。以上から、励磁突入電流 i_m を求めることができる。

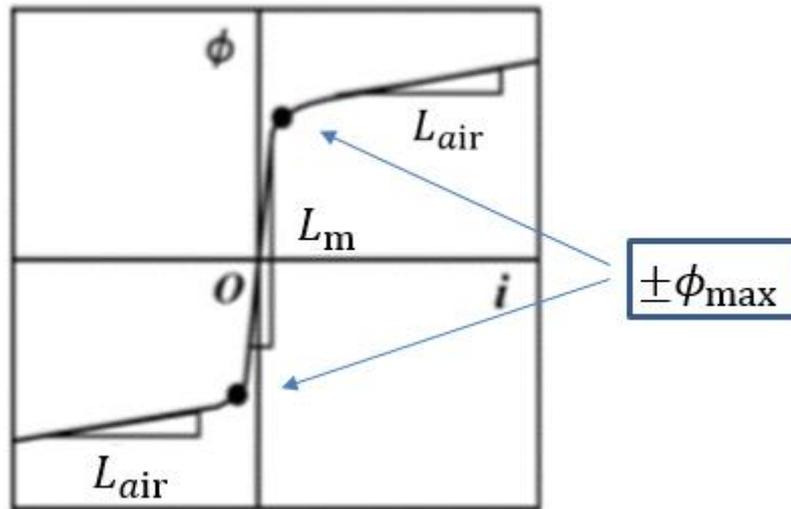


Fig. 1.5 : i - ϕ 簡易磁気特性

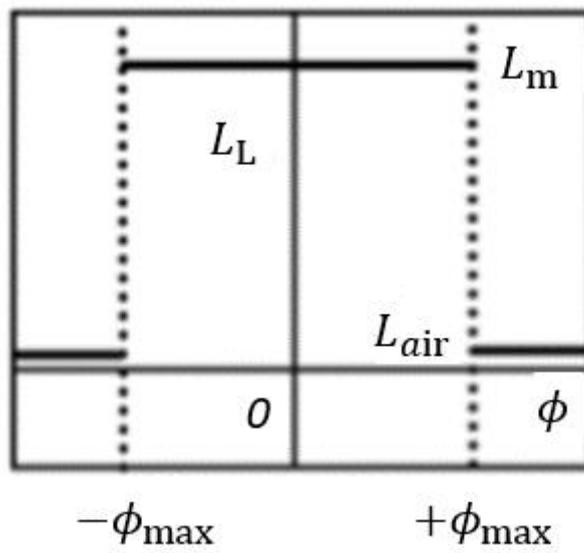


Fig. 1.6 : ϕ - L 特性[1]

1.5 常微分方程式の計算手法

本稿で励磁突入電流の計算に用いた常微分方程式の数値計算法は、1段階法で陽的な解法であり、ルンゲ・クッタ法に比べ誤差が小さくなるよう、A. Ralstonによって改良された最適ルンゲ・クッタ法である。この計算法は時間の刻み幅 Δt に対して係数が変化することから、 Φ -L特性の階段状の変化に対応できる。 i を時間 t の関数 $i(t)$ とし、 i の時間微分 di/dt を関数 $f(t, i)$ とおくと最適ルンゲ・クッタ法は式(1.7)で定式化される。

$$\begin{aligned}k_{00} &= f(t_n, i_n), k_1 = i_n + \alpha_{10}k_{00} \\k_{11} &= f(t_n + \tau_1, k_1), \quad k_2 = i_n + \alpha_{20}k_{00} + \alpha_{21}k_{11} \\k_{22} &= f(t_n + \tau_2, k_2), \quad k_3 = i_n + \alpha_{30}k_{00} + \alpha_{31}k_{11} + \alpha_{32}k_{22} \\k_{33} &= f(t_n + \tau_3, k_3) \\i_{n+1} &= i(t_n + \Delta t) = i_n + (c_0k_{00} + c_1k_{11} + c_2k_{22} + c_3k_{33})\Delta t\end{aligned}\quad (1.7)$$

ここで、

$$\begin{aligned}\tau_1 &= 0.4\Delta t, \quad \tau_2 = 0.45573725\Delta t, \quad \tau_3 = \Delta t \\ \alpha_{10} &= 0.4\Delta t \\ \alpha_{20} &= 0.29697761\Delta t, \quad \alpha_{21} = 0.15875964\Delta t \\ \alpha_{30} &= 0.21810040\Delta t, \quad \alpha_{31} = -3.05096561\Delta t \\ \alpha_{32} &= 3.83286476\Delta t \\ c_0 &= 0.17476028, \quad c_1 = -0.55148066 \\ c_2 &= 1.20553560, \quad c_3 = 0.17118478\end{aligned}$$

上記の式(1.7)から励磁突入電流を求めることができる。

1.6 差分進化法

差分進化法(DE)とは、進化的アルゴリズムの一種であり、確率的な直接探索によって解集団を用いた多点探索を行うアルゴリズムである。差分進化法は非線形問題、微分不可能な問題などの現実的な実行時間では厳密な解を求めることが困難な問題に対して近似解を求めることが可能であり、様々な最適化問題に適応されている。また以下にアルゴリズムの流れを示す。

1. ベクトル集団の作成

指定された各次元の最小値と最大値の範囲で一様乱数によって N 個の初期個体 \mathbf{X}_{Ri} の生成を行うことで、初期集団 $\{\mathbf{X}_{Ri}, i = 1, 2, \dots, N\}$ を構成する。

2. 変異

各個体 \mathbf{X}_{Ri} に対し、4つの個体 $\mathbf{X}_{R0}, \mathbf{X}_{R1}, \mathbf{X}_{R2}, \mathbf{X}_{R3}$ を重複しないようにランダムに選択する。新しいベクトル \mathbf{U} (mutant vector)を基本ベクトル \mathbf{X}_{R1} 及び差分ベクトル $\mathbf{X}_{R2} - \mathbf{X}_{R3}$ から以下のように生成する。

$$\mathbf{U} = \mathbf{X}_{R1} + F(\mathbf{X}_{R2} - \mathbf{X}_{R3}) \quad (1.8)$$

スケーリングファクター F はユーザが値を設定する変数で $[0,1]$ の区間で定義されるアルゴリズムの制御パラメータである。

3. 交叉

親ベクトル(parent vector)を \mathbf{X}_{R0} とし、ベクトル \mathbf{U} と \mathbf{X}_{R0} の各次元の要素を交叉率 CR の確率で \mathbf{U} の要素から継承し、 $1 - CR$ の確率で親 \mathbf{X}_{R0} から継承することで子ベクトル(child vector)を生成する。

4. 選択

子ベクトルが親ベクトル \mathbf{X}_{R0} より評価が良いと推定された場合、親ベクトル \mathbf{X}_{R0} を子ベクトルに置換する。

5. 終了判定

終了条件を満たしていればアルゴリズムは終了する。満たしていない場合、2. から 5. を繰り返す。

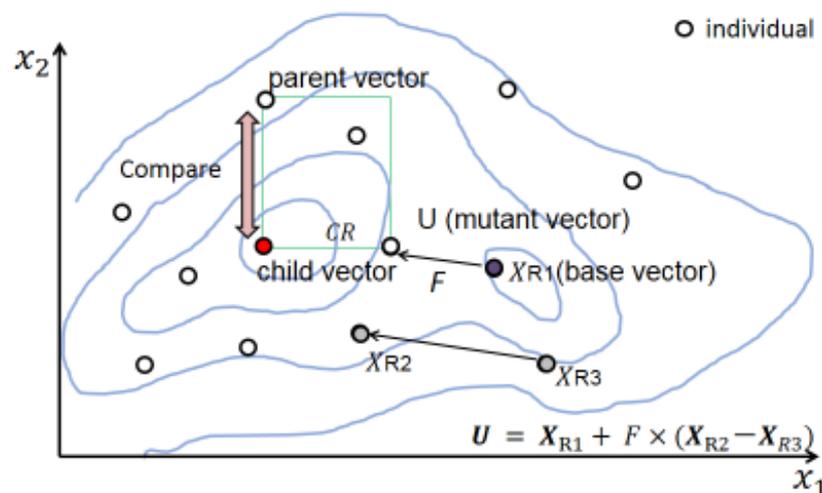


Fig. 1.7 : DE の概略図[4]

DEの特徴としてランダムに選択した個体間の差分ベクトルを用いて新たな個体を生成する点が挙げられる。この様に差分ベクトルを用いることによって、初期探索では

Fig. 1.8 のように差分ベクトルが大きく探索範囲も比較的広範囲である。また、探索が進んで行くにつれて解集団が解付近に集まっていき、さらに差分ベクトルが小さくなることによって解があると思われる付近を詳細に探索可能である(Fig. 1.9)。

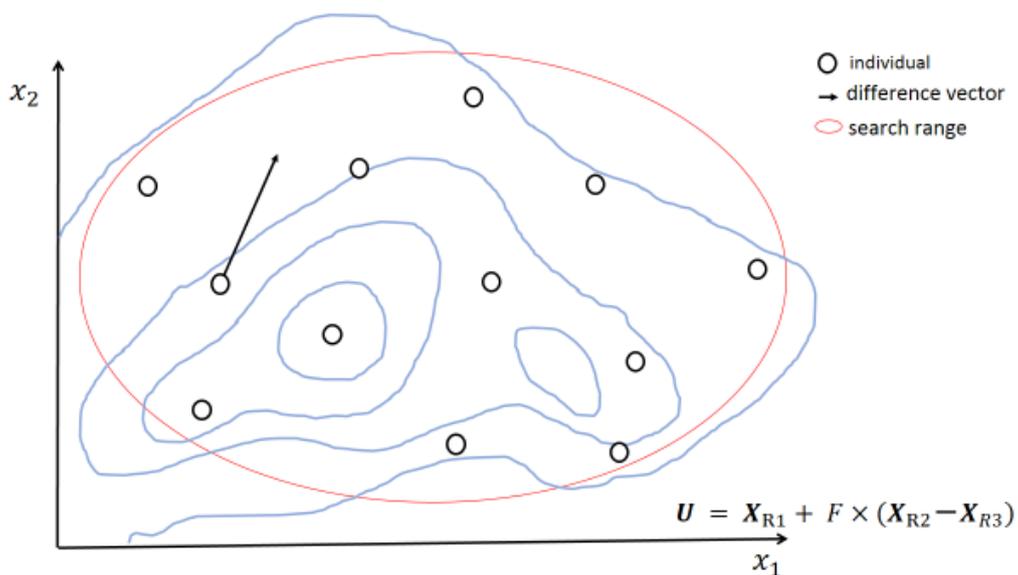


Fig. 1.8 : DE の探索初期[4]

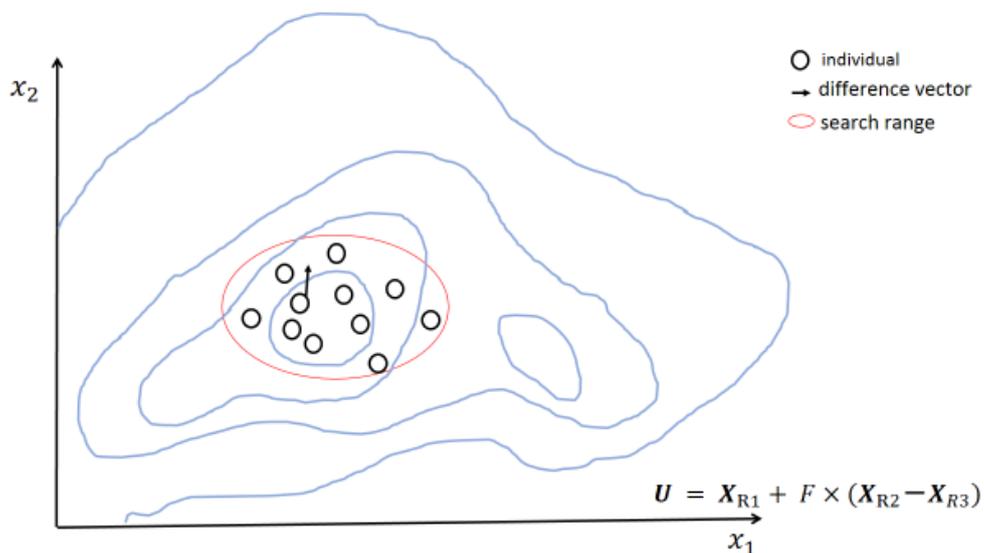


Fig. 1.9 : DE の探索中盤[4]

1.7 遺伝的アルゴリズム

遺伝的アルゴリズム (GA) とは 1975 年にミシガン大学の Jhon Henry Holland によって提案された近似解を探索するメタヒューリスティックなアルゴリズムである。メタヒューリスティックとは、どのような問題に対しても汎用的に対応できるということである。GA はデータを遺伝子で表現し、その遺伝子群を 1 個体として扱う。この個体が生物の進化の過程を模したような選択、交叉、突然変異といった遺伝子操作を行い、解の探索を行う。また、以下にアルゴリズムを示す。

1. 初期解の生成

染色体 X_I (I は個体番号) を構成する。まず X_I の初期個体 (親) J 個 ($I = 1, 2, \dots, J$; J は 4 以上の偶数) をそれぞれ遺伝子情報の制約範囲内でランダムに生成する。

2. 交叉

個体数 J 個に対し、 I の値が $(1, 2), (3, 4), \dots, (J-1, J)$ となる組をそれぞれ親とする。次に、染色体の一定の切断箇所において交叉を行い、新たな個体 (子) を J 個生成する。

3. 突然変異

$[0, 1]$ における一様乱数を r として式(1.9)で算出できる乱数 $C_I (I = J+1, J+2, \dots, 2J)$ を用いて、式(1.10)より遺伝子情報に突然変異をそれぞれ制約範囲内で生じさせる。

$$C_I = 1 - \sqrt{1 - r} \quad (1.9)$$

$$x' = x \left\{ 1 + \frac{C_I}{5} (-1)^{100r} \right\} \quad (1.10)$$

ここで、 x は遺伝子情報、 x' は突然変異後の遺伝子情報、 $100r$ は 100 を超えない最大の整数。

4. 各個体の適応度を計算

得られた $2J$ 個の個体それぞれに対して適応度を計算し、適応度の高い上位 J 個を次世代へと引き継ぐ。

5. 指定された試行回数に達するまで 2 から 4 を繰り返す。その後終了。

1.8 先行研究

上記したように、これまでの研究では最適ルンゲ・クッタ法と GA を組み合わせて、機器定数推定が行われている。その結果を Table 1.1 に示す。この結果よりより励磁突入電流波形を求めたところ、Fig. 1.11 のようになった。測定波形と推定波形は一致しているとは言い難く、特に電流の立ち上がり部分において大きな誤差が見受けられる。また、Fig. 1.10 から推定した機器定数の値の分散が大きいことも分かり、特に、 L_{m1} に注目すると最小値が $L_{m1} = 4.03 \times 10^4$ mH、最大値が $L_{m1} = 7.16 \times 10^4$ mH と差が非常に大きく、この点に関しても十分に改善の余地があると考えられる。

Table 1.1 : GA により得られた最も評価の良い機器定数

L_{air} [mH]	ϕ_{res} [%]	L_c [mH]	θ_0 [degree]	L_m [mH]	B_c [T]
4.68×10^1	-2.86×10^1	3.50×10^1	1.95×10^2	6.40×10^4	1.67

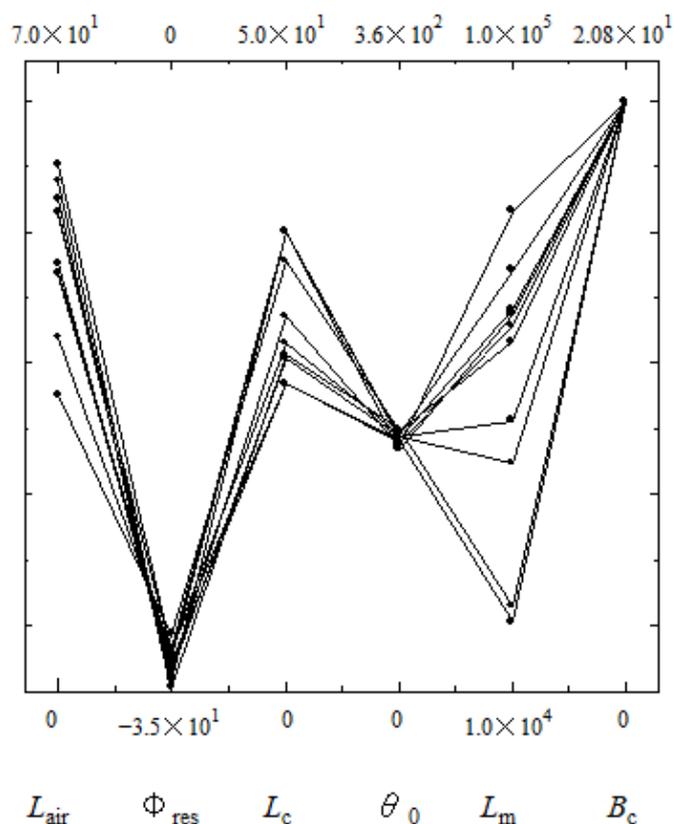


Fig. 1.10 : GA により求めた機器定数

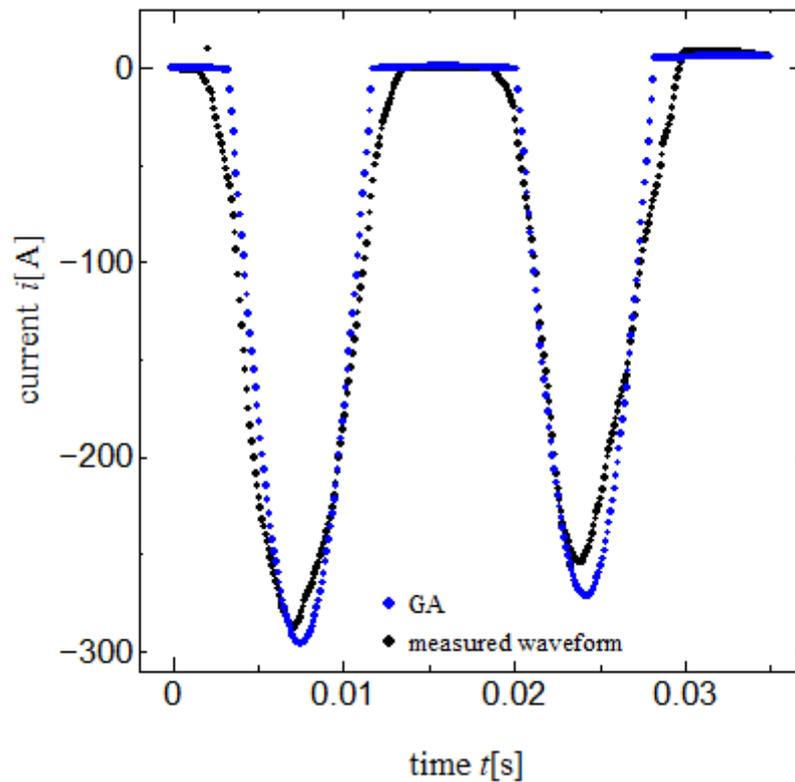


Fig. 1.11 : GA により求めた励磁投入電流波形

1.9 本研究の目的

これまでの研究では変圧器の励磁突入電流波形をもとに行う機器定数推定を最適ルンゲ・クッタ法と GA を用いることによって行われてきた。しかしながら、Fig. 1.11 から分かるように大きな誤差が生じている部分があり、まだまだ改善の余地があると考えられる。

そこで本研究では、GA の代わりに DE を用いることによって変圧器の機器定数推定のさらなる精度の向上を図ることを目的とする。

第2章 推定手法

2.1 計算手法

本研究では、DE と最適ルンゲ・クッタ法を用いて変圧器の機器定数を求める。測定波形を Fig. 2.1 に示す。今回は測定波形の $t = 0.035$ s までを計算対象とする。測定波形は 1.0×10^{-4} s ごとに測定しているので最適ルンゲ・クッタ法の時間の刻み幅を $\Delta t = 1.0 \times 10^{-4}$ s とし、各時間において測定値と計算値の距離を計算し、その総和をサンプル数で割ることによりそれぞれの誤差の平均値を出している。今回はこれを評価関数とし式(2.1)に示す。

$$d = \frac{1}{N} \sum |i_{\text{MEA}} - i_{\text{SIM}}| \quad (2.1)$$

ここで i_{MEA} は測定値、 i_{SIM} は計算値、 N はサンプル数を表す。

今回推定する機器定数は、漏れインダクタンス L_c 、励磁インダクタンス L_m 、空心インダクタンス L_{air} 、定格磁束密度 B_n 、初期位相 θ_0 、残留磁束 ϕ_{res} である。これらの値を式(1.1)~(1.7)に代入し $t = 0.035$ s まで計算し、式(2.1)により評価し解を探索していく。また、Table 2.1 に今回の解候補群の探索範囲を示す。

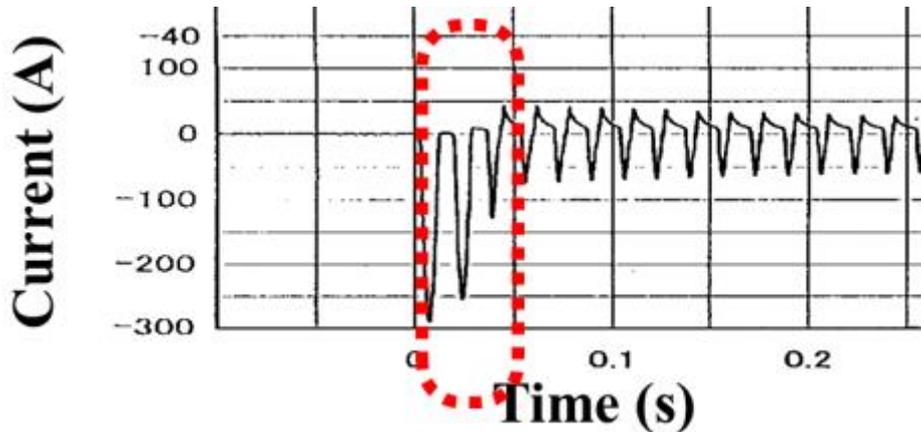


Fig. 2.1 : 測定波形

Table 2.1 : 解候補群の探索範囲

機器定数	探索範囲
漏れインダクタンス [mH]	$0 < L_c$
励磁インダクタンス [mH]	$L_c < L_m$
空心インダクタンス [mH]	$0 < L_{air} < 10L_c$
定格磁束密度 [T]	$1.55 < B_n < 1.7$
初期位相 [degree]	$0 \leq \theta_0 < 360$
残留磁束 [%]	$-85 \leq \phi_r \leq 85$

2.2 計算環境

Table 2.2 に計算環境を示す。

Table 2.2 : 計算環境

OS	Windows 10 Pro
プロセッサ	AMD Athlon(tm) II X2 220 Processor
コア数	2
スレッド数	2
動作周期	2.8 GHz

第3章 結果及び考察

3.1 差分進化法と遺伝的アルゴリズムの比較

今回は交叉率 $CR = 0.9$ 、スケールリングファクター $F = 0.8$ 、個体数 20、世代数 2000 として計算を行った。計算した波形を Fig. 3.1 に示す。Fig. 3.1 から分かるように GA では精度が優れなかった立ち上がりの部分が比較的改善されている。また、Table 3.2 から分かるように評価関数の値も $d = 9.57$ と GA の半分ほどの値になっており、より良好な結果が得られている。処理時間も約 10 分の 1 になっている。さらに Fig. 3.2 から解の改善速度の違いも見られる。DE の方が初期の評価関数の値が大きいにも関わらず、世代数 200 から 300 程度で GA より評価関数の値が小さくなっており、さらにその後も解が改善していつていることが分かる。一方で GA は評価関数の値は小さくなっているものの、DE と比べ非常にその速度が遅いことが分かる。すなわち解の改善速度が遅いと言える。GA は探索範囲が一定なのに対し、DE は探索初期では差分ベクトルが大きいいため広範囲の解探索を行っているものの、それぞれの個体が解があると思われる付近に収束していき、個体が収束することによって差分ベクトルが小さくなり探索範囲が限定され、解があると思われる付近をさらに詳細に探索が可能である。DE は GA に比べ効率的な解探索が行うことができると言える。ゆえに、解の改善速度も速く評価関数の値も小さくなっている。さらに、それぞれの手法で求められた機器定数の Fig. 1.10、Fig. 3.3 を比較すると収束度の違いがみられる。差分進化法は探索初期では比較的広範囲を探索しているが、世代が進むにつれて狭い範囲に個体が収束していき探索する特徴があるため、機器定数の分散が小さくなっていると考えられる。

Table. 3.1 : DE による機器定数推定の結果

L_{air} [mH]	ϕ_{res} [%]	L_c [mH]	θ_0 [degree]	L_m [mH]	B_c [T]
1.49×10^3	-5.59×10^1	3.22×10^1	1.95×10^2	3.30×10^4	1.69

Table 3.2 : GA と DE の評価関数と処理時間の比較

	Evaluation function d	Time [s]
GA	19.5	5.54
DE	9.57	0.515

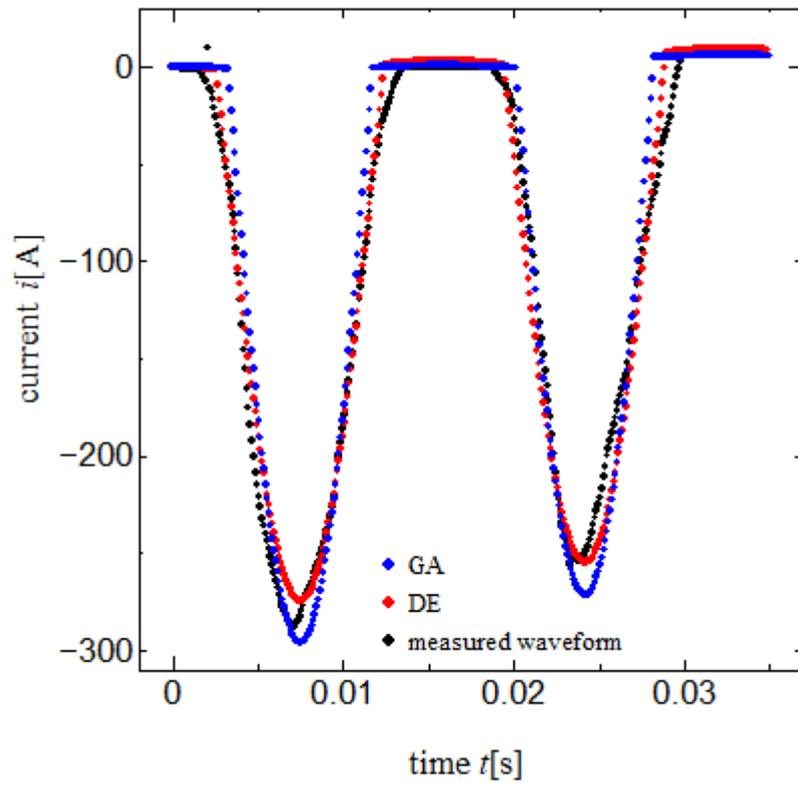


Fig. 3.1 : DE によって求めた励磁突入電流波形

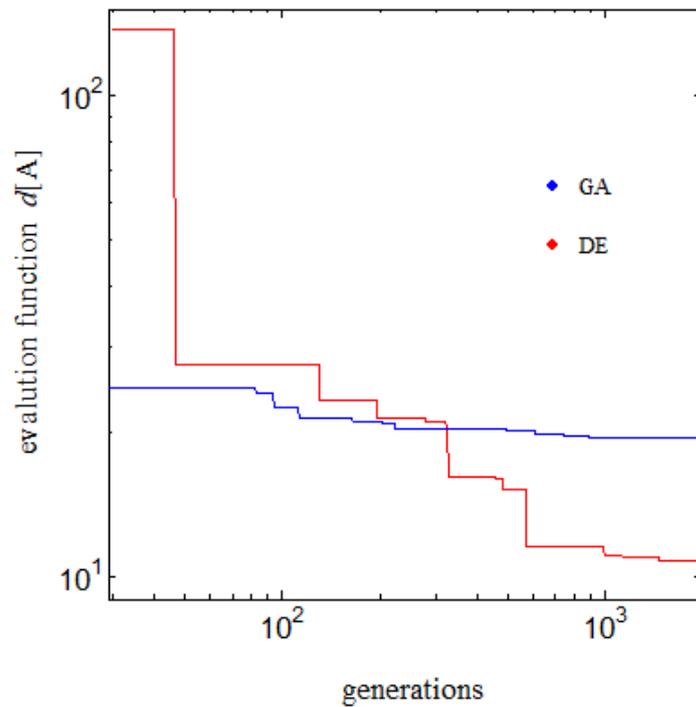


Fig. 3.2 : DE と遺伝的アルゴリズムの評価関数の値の変化

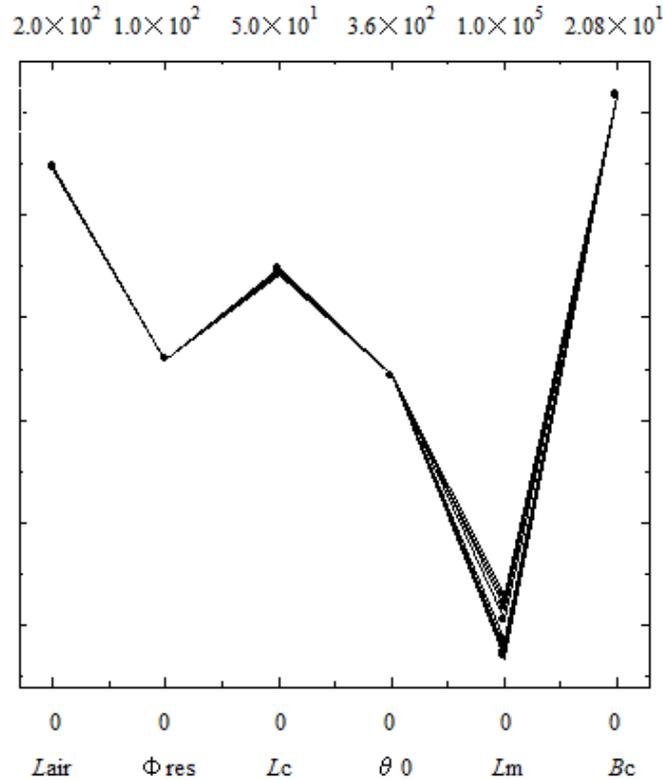


Fig. 3.3 : DE によって求めた機器定数

3.2 差分進化法の制御パラメータ

DE を制御するパラメータにはスケーリングファクター F と交叉率 CR がある。ここではこれらのパラメータを変化させたとき、評価関数がどのように変位するのか調べる。

まず、スケーリングファクター F の値を0.2から1.0まで0.2刻みで変化させた場合の評価関数の値の変位を見てみる。このとき交叉率 CR は0.9である。Fig. 3.4 から $F = 0.8$ のとき最も評価関数の値が小さい、すなわち最も良好であり、 $F = 0.2$ のとき最も評価関数の値が大きい、すなわち最も良好でない結果が得られている。DE において Fig. 1.8 にも示したように、探索初期では差分ベクトルが大きく、広範囲の探索を行うことが可能であるが、 F の値が小さすぎると差分ベクトルの大きさも小さくなってしまい、探索初期で十分な範囲の解探索ができていないと考えられる。また、十分な範囲を探索できていないことから局所解に陥りやすくなるようになっており、Fig. 3.4 でも見受けられるように $F = 0.2$ のとき他の F の値のときと比べ、明らかに評価関数の値が大きい解に収束していることが分かる。以上のことから、スケーリングファクター F の値が小さすぎると、DE の特徴の一つである広大な範囲の初期探索が十分に行うことができず、結果的に DE 自体

の性能も劣化してしまっていると言える。

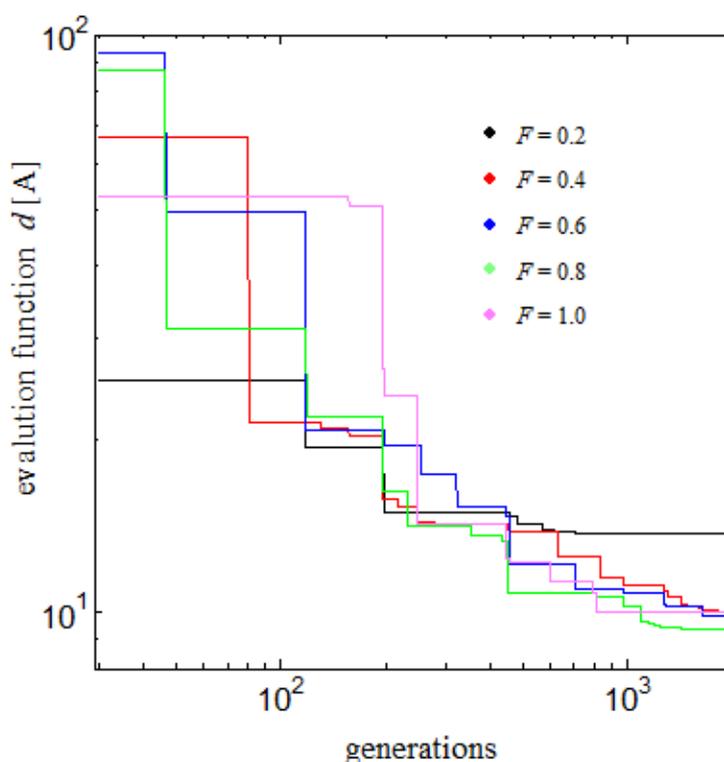


Fig. 3.4 : スケーリングファクター F による評価関数の値の変化

次に交叉率 CR の値を0.2から1.0まで0.2刻みで変化させた時の評価関数の変位を見ていく。このときスケーリングファクター F は0.8である。Fig. 3.5 より $CR = 1.0$ のとき最も評価関数の値が小さくなり、 $CR = 0.2$ のとき最も評価関数の値が大きくなっている。また、 CR の値が大きいほど比較的解の改善速度が速い。 CR の値が大きいほど交叉が積極的に行われているためより広い探索範囲を有しているためだと考えられる。ゆえに、 $CR = 0.2$ のときは解の改善速度が遅く同じ世代数試行しても他の場合と比べ、評価関数の値が大きくなっていると考えられる。

次にスケーリングファクター F と交叉率 CR をそれぞれ変化させた場合について見ていく。Fig. 3.3、Fig. 3.4 において F 、 CR の値が小さい方が評価関数の値が大きかった様に Fig. 3.6 でも同じような結果が得られている。この結果から今回の場合は $F = 0.6$ 、 $CR = 0.8$ または $CR = 1.0$ 程度で計算を行うことが最も適していると言える。つまり、差分ベクトルはある程度大きさが必要であり、交叉は積極的に行われる方が良いと言える。

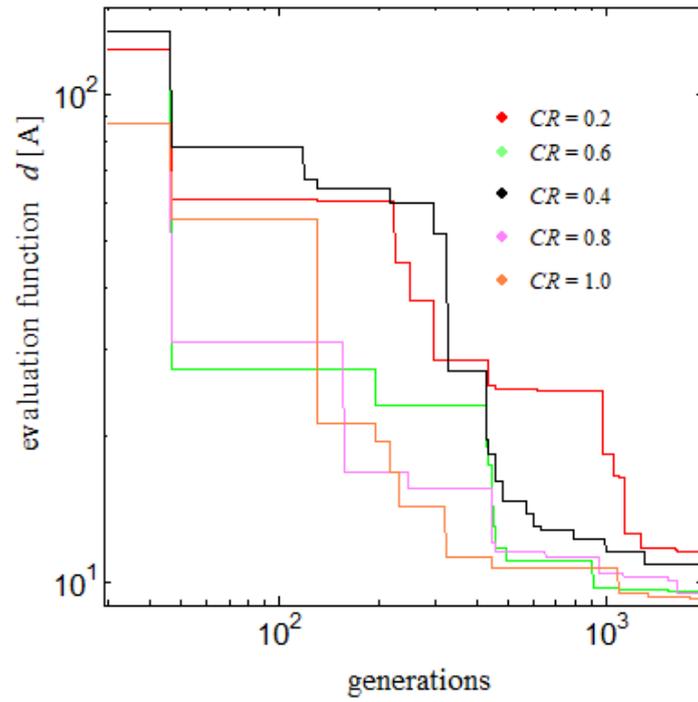


Fig. 3.5 : 交叉率 CR による評価関数の変化

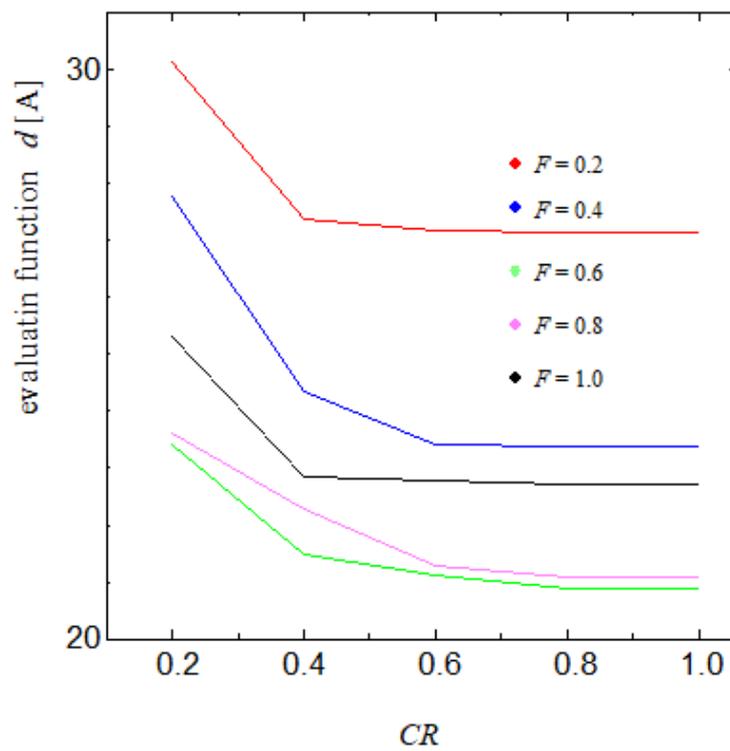


Fig. 3.6 : F 、 CR をそれぞれ変化させた場合の評価関数の変化

3.3 最適ルンゲ・クッタ法の時間刻み幅 Δt

ここでは最適ルンゲ・クッタ法の時間刻み幅 Δt を変化させ評価関数の変位を見てみる。

機器定数を DE で推定した機器定数で固定して Δt のみを変化させた場合の評価関数を計算した。その計算結果を Table 3.3 と Fig.3.7 に示す。評価関数が最も小さくなったのは $\Delta t = 1.0 \times 10^{-4}$ s でありその付近で良好な結果を示している。しかし、 Δt を 5.0×10^{-4} s と大きくした場合、急激に評価関数の値が大きくなっている。測定波形の測定周期は 1.0×10^{-4} s であり 350 点測定している。よって、Table. 3.3 においては Δt が 1.0×10^{-4} s 以下の場合は 350 点すべての測定値において比較・評価が可能である。しかし、 $\Delta t = 5.0 \times 10^{-4}$ s の場合は 175 点の測定値のみで比較・評価を行っているのでサンプル数が不十分であり、さらに Δt の値が大きいことから最適ルンゲ・クッタ法の精度自体も劣化しているため評価関数の値も大きくなってしまったと考えられる。次に $\Delta t = 2.0 \times 10^{-5}$ s 以下の値で評価関数の値が大きくなっていることに着目する。 Δt の値が小さいほど精度の良い計算結果が得られると考えたが、精度が落ちていくことが分かった。最適ルンゲ・クッタ法は常微分方程式の数値計算法の一種であり、ここではその性質が影響していると考えられる。式 (1.7) に示したように、最適ルンゲ・クッタ法は初期値から時間刻み幅 Δt [s]ごとに計算結果を出している。さらに、 Δt [s]後の計算を行うたびに局所解が生じている。局所解とは、 Δt [s]後の計算を行うごとに生じる真の値との差である。また、局所解の総和を累積誤差という。例えば $\Delta t = 1.0 \times 10^{-5}$ s の場合、この累積誤差が大きくなり評価関数も大きくなってしまったと考えられる。 $\Delta t = 1.0 \times 10^{-4}$ s の場合、測定波形は 0 s から 0.035 s なので 1 波形に対して 350 回計算を行っている。すなわち、局所誤差も 350 回生じている。一方で、 $\Delta t = 1.0 \times 10^{-5}$ s の場合は 1 波形に対して 3500 回もの計算を行っていることになるので、局所解も多数生じ累積誤差が大きくなってしまい、その結果評価関数の値も大きくなってしまったと考えられる。その様子が Fig. 3.9 からも分かる。したがって、今回の場合は $\Delta t = 1.0 \times 10^{-4}$ s に設定し計算を行った場合が最も精度の高い計算が可能である。

Table 3.3 : 機器定数を固定し時間刻み幅 Δt を変化させた場合の評価関数 d の変化

Δt [s]	1.0×10^{-5}	2.0×10^{-5}	5.0×10^{-5}	1.0×10^{-4}	2.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}
d [A]	18.21	15.42	12.66	10.64	14.23	26.99

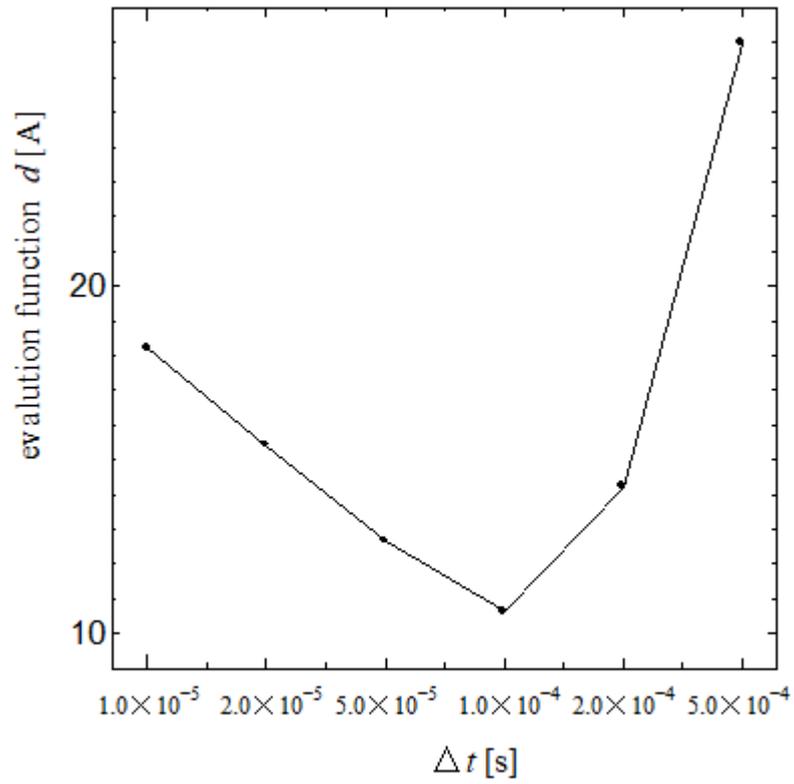


Fig. 3.7 : 時間刻み幅の変化による評価関数の変化

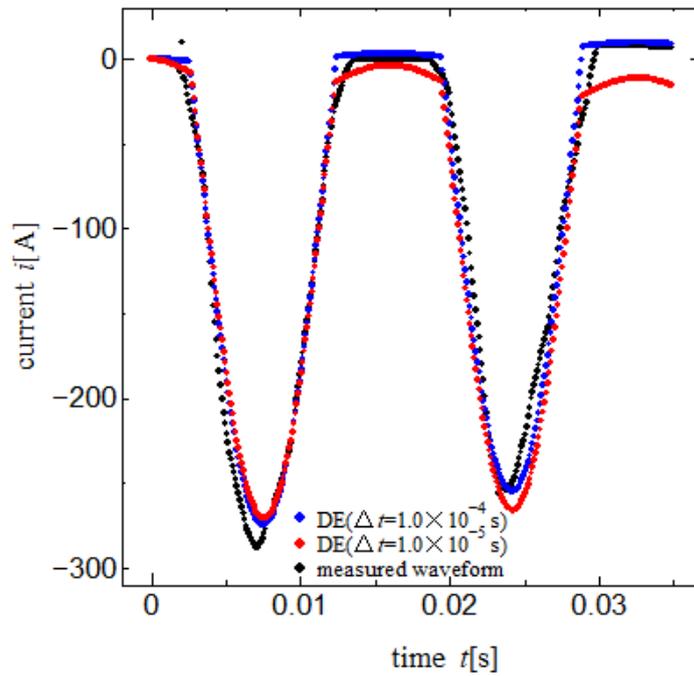


Fig. 3.8 : 時間刻み幅を変化させたときの波形

3.4 1 波形のみ計算

ここでは励磁突入電流の1波形のみ、 $t = 0.015$ s までの計算を行った。Fig. 3.9 に計算した波形を示す。1 波形分の計算に関しては波形全体の計算を行った場合より $t = 0.015$ s までのみ計算した場合の方が評価関数の値は良好なものであった。しかし、 $t = 0.035$ s までの評価関数を計算したところ、2 波形目で大きなずれが生じているため、 $t = 0.015$ s までで機器定数の推定を行った場合の方が優れた値を示した。よって、波形全体を対象に機器定数を推定する方が適当である。

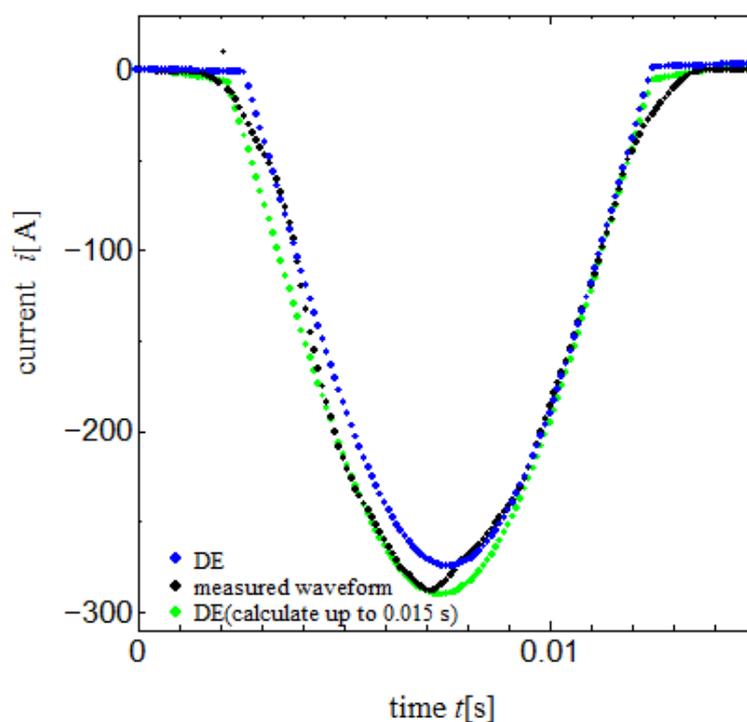


Fig. 3.9 : DE による計算を1波形のみ行った場合の励磁突入電流波形
($t = 0.015$ s まで)

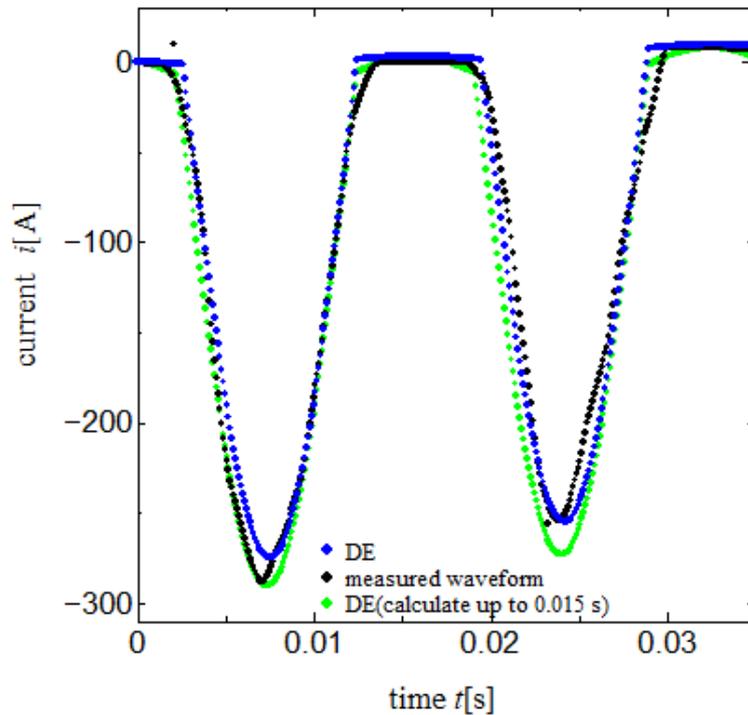


Fig. 3.10 : DE による計算を 1 波形のみ行った場合の励磁突入電流波形
($t = 0.035$ s まで)

3.5 世代数とスケールリングファクター F

ここまでは世代数を 2000 に固定して計算してきたが、ここでは世代数を 10000 まで上げて計算を行う。その結果を Fig. 3.11 に示す。このとき交叉率とスケールリングファクターはそれぞれ $CR = 0.8$ 、 $F = 0.6$ である。評価関数の値は、3000 世代を超えたあたりから減少しなくなっている。つまり解が改善されなくなっているのである。その解決策としてスケールリングファクター F をある世代数で小さい値に変化させることを考えた。DE では探索初期は差分ベクトルが大きいため広範囲の探索をしており、探索終盤は解が収束していき差分ベクトルが小さくなるため解があると思われる狭い範囲の探索を行っている。この探索終盤で F の値を小さくすることによって差分ベクトルも小さくし、さらに詳細な探索が可能になるのではないかと考えたからである。今回は $F = 0.6$ と設定し、解の改善が見られなくなった 4000 世代から $F = 0.2$ に変化させ計算を行った。その結果を Fig. 3.12 に示す。 F の値を 4000 世代で小さくすることによって解の改善を図ったが、評価関数の値は減少しなかった。その原因は式 (1.8) から推測できる。探索終盤では解が収束しているため式 (1.8) の $\mathbf{X}_{R2} - \mathbf{X}_{R3}$ の部分が非常に小さい値になっている。 F の値を小さくすることにより差分ベクトルを小さくして解の改善を図ったが、 $\mathbf{X}_{R2} - \mathbf{X}_{R3}$ が十分に小さくなっているため、逆に差分ベクトルが小さく

なりすぎて解の進化が滞ってしまったためだと考えられる。

次に、4000 世代から $F = 1.0$ にして計算を行う。 F の値を小さくすると差分ベクトルが小さくなりすぎて進化が行われなかったためである。その結果を Fig. 3.13 に示す。さらに、 $F = 0.2$ から $F=1.0$ に変化させた場合も計算した。その結果を Fig. 3.14 に示す。Fig. 3.13 では評価関数の値に改善は見られなかったが、Fig. 3.14 では評価関数が小さくなっていることが分かる。探索序盤では、広範囲の探索ができておらず、局所解に陥って評価関数も大きくなっているが、4000 世代からは $F = 1.0$ になったため解が急速に改善されていき、評価関数お値も最も小さい結果が得られた。

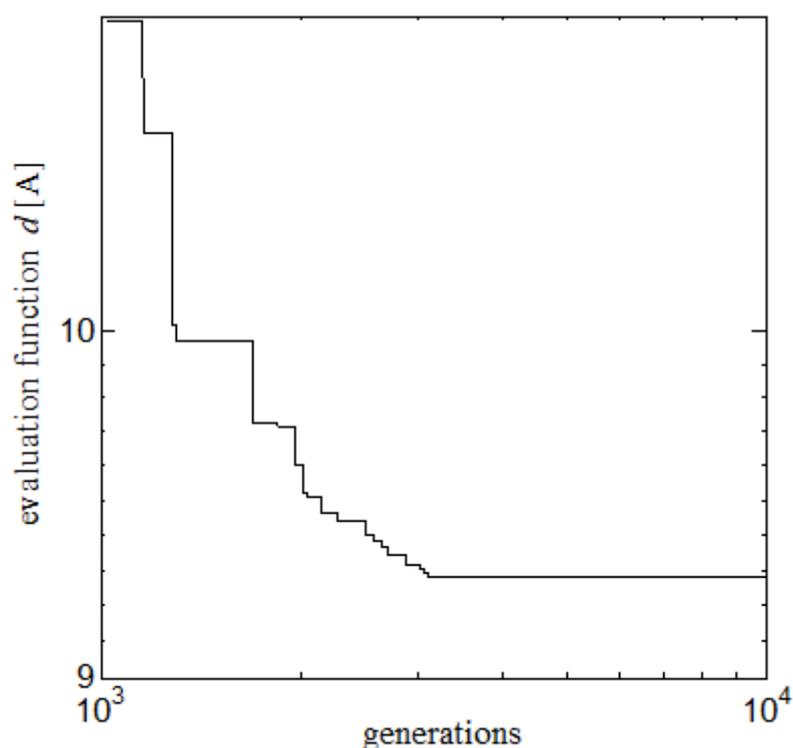


Fig. 3.11 : 10000 世代まで計算を行った場合の評価関数の変化

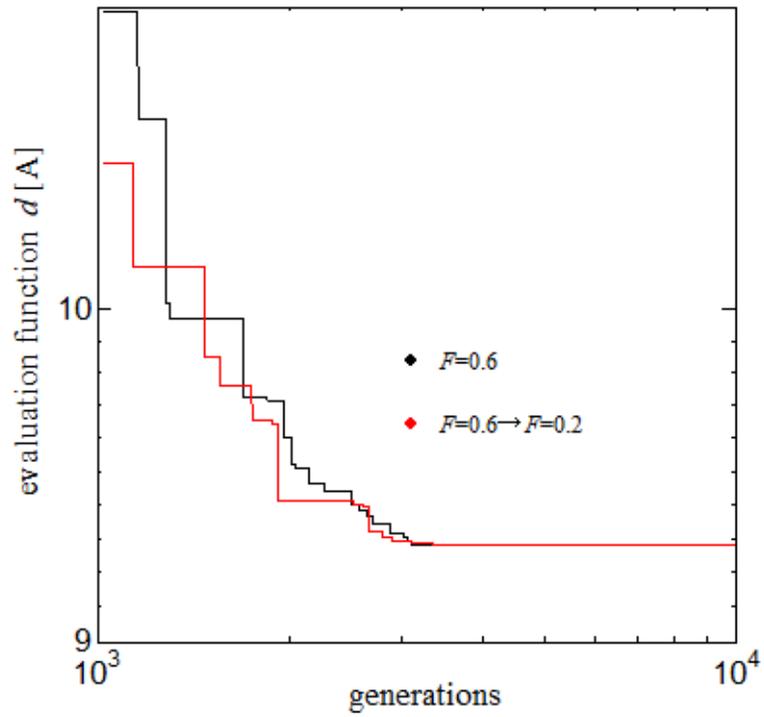


Fig. 3.12 : $F = 0.6$ から 4000 世代で $F = 0.2$ に変化させたときの評価関数の変化

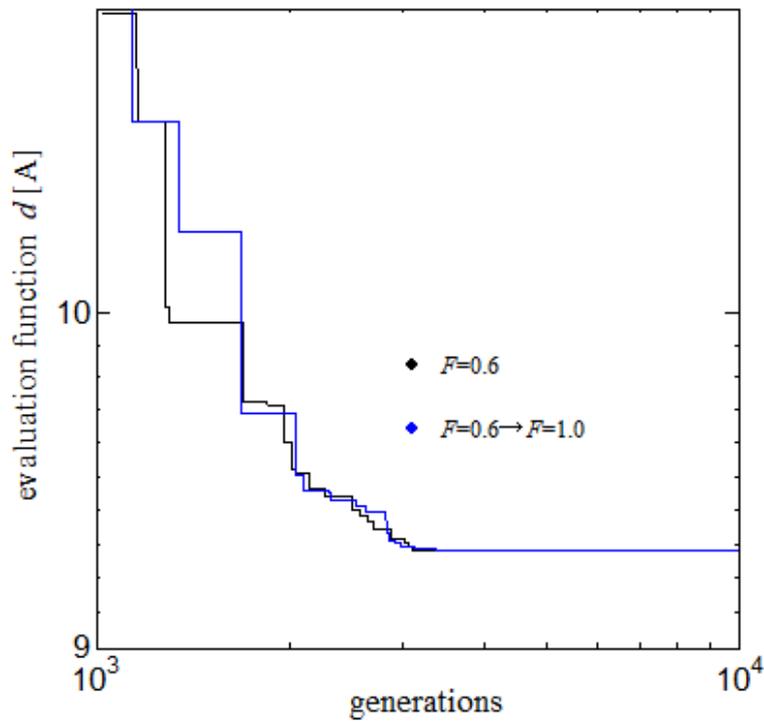


Fig. 3.13 : $F = 0.6$ から 4000 世代で $F = 1.0$ に変化させたときの評価関数の変化

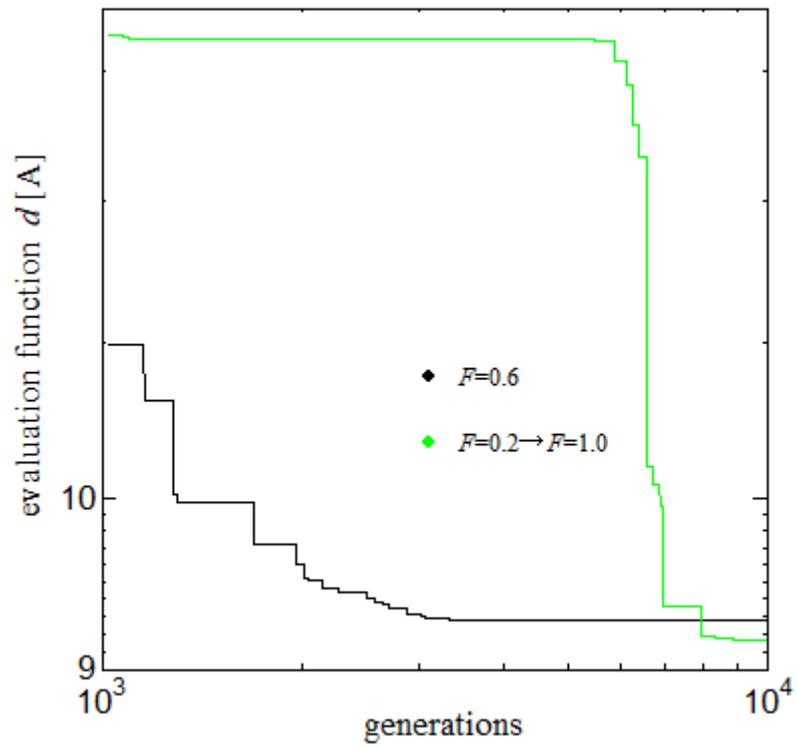


Fig. 3.14 : $F = 0.2$ から 4000 世代で $F = 1.0$ に変化させたときの評価関数の変化

3.6 世代数と交叉率CR

Fig. 3.5 ではCRの値が小さい場合比較的評価関数値が大きくなっているが、世代数を大きくすると評価関数値は十分に小さくなると考えた。そこで、世代数を 10000 まで上げて $F = 0.8$ としCRの値を変えて計算を行う。その結果を Fig. 3.15 に示す。CR = 0.8 のとき最も評価関数値が小さくなったが、すべての場合において評価関数値は 9–10 の範囲まで改善されている。2000 世代までの計算ではCRの値によって評価関数値に大きな差が生じていたが、10000 世代まで計算を行うことによってその差は比較的小さくなっており、さらにCR = 0.2の場合が3番目に良好な結果となっている。CRは大きいほど解の改善速度が速いが 5000 世代までに、解の改善があまり見られなくなった。また、CRは交叉する確率であるため小さい場合でも確実に交叉が行われており、解の改善速度は遅いものの、着実に評価関数値は減少していき 10000 世代も計算を行うとCRの値がいかなる場合であっても、おおよそ同じ値に収束していったと考えられる。しかし、小さい世代数で良好な結果を得る、効率の良い計算を行うならば、CRは大きく設定した方が良いと言える。

また、CR = 0.8のとき 5000 世代までに評価関数値が減少しなくなっているためスケールリングファクターの場合と同様に 5000 世代からCRを小さくすることによって解があると思われる付近を詳細に探索し、解を改善できないかと考えた。そこで、5000 世代からCR = 0.8からCR = 0.2と変化させ計算を行った。その結果を Fig. 3.16 に示す。しかし評価関数値は減少しなかった。スケールリングファクターの場合と同様で、探索終盤では解が収束しているため式 (1.8) の $\mathbf{X}_{R2} - \mathbf{X}_{R3}$ の部分が非常に小さい値になっている。そのため、差分ベクトルが小さくなりすぎてしまい解の改善が見られなくなったと考えられる。

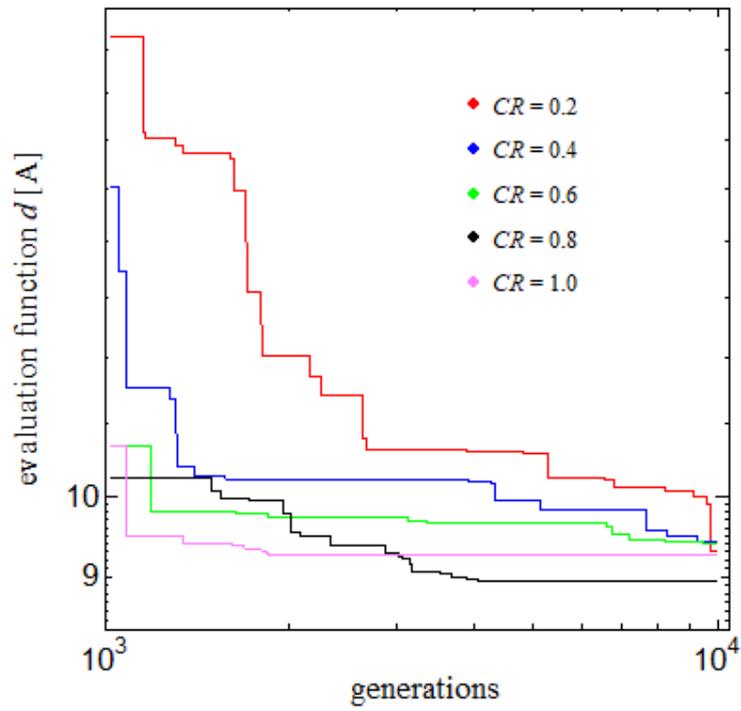


Fig. 3.15 : 様々なCRを用いて計算を行った場合の評価関数の変化

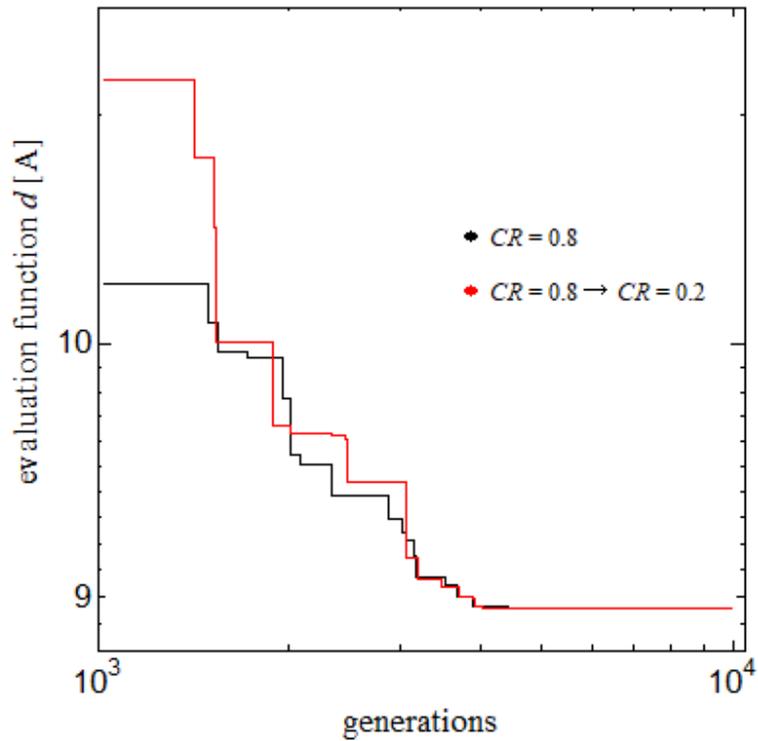


Fig. 3.16 : $CR = 0.8$ から 5000 世代で $CR = 0.2$ に変化させた場合の評価関数の変化

3.7 親ベクトルを常に最良の個体に固定した場合

DEにはいくつか種類があり、今回はDE/rand/1/binというDEを使って計算していた。これは、親ベクトルを無作為に選択し差分ベクトルは1つ、一定確率で交叉を行うものである。また一方で、DE/best/1/binは親を常に最も評価の高い個体に設定し計算を行うDEである。DE/best/1/binを用いることによって評価関数の値を小さくすることを試みた。CRとFをそれぞれ変化させた場合の評価関数の変化を調べてみた。その結果をFig. 3.15に示す。評価関数の値が最も小さくなったのは、 $F = 0.8$ 、 $CR = 0.4$ のときであった。このとき評価関数の値は $d = 11.350$ である。DE/rand/1/binより精度を高くすることはできなかった。また、DE/rand/1/binの場合は全体的にCRの値が大きい方が比較的评价関数の値が小さくなっていたが、DE/best/1/binの場合は逆の特性を示している。1.7節にも表記したように、子ベクトルは交叉率CRの確率で新しいベクトルUから要素を継承し、 $1 - CR$ の確率で親ベクトルから要素を継承する。今回、親ベクトルは最良個体に設定しているため、親の要素をより多く継承した方がより良い子ベクトルが得られるためCRの値が小さい方が比較的に良い結果が得られたと考える。また、パラメータをグラフにした図をFig. 3.16に示す。Fig. 3.3と比較すると違いは歴然で分散が非常に大きくなっている。評価関数の値も最良の個体は $d = 11.350$ と比較的良好だが、2番目に良い個体でも評価関数の値が $d = 64.38$ と非常に大きな値になっている。DE/best/1/binがDE/rand/1/binに精度が劣ってしまったのは分散が大きくなってしまったためだと考えられる。DEは探索初期では広範囲を探索し探索終盤で解があると思われる付近を詳細に探索することができるが、解が収束していないため探索終盤の詳細な探索が行えず、精度が劣化したと考えられる。

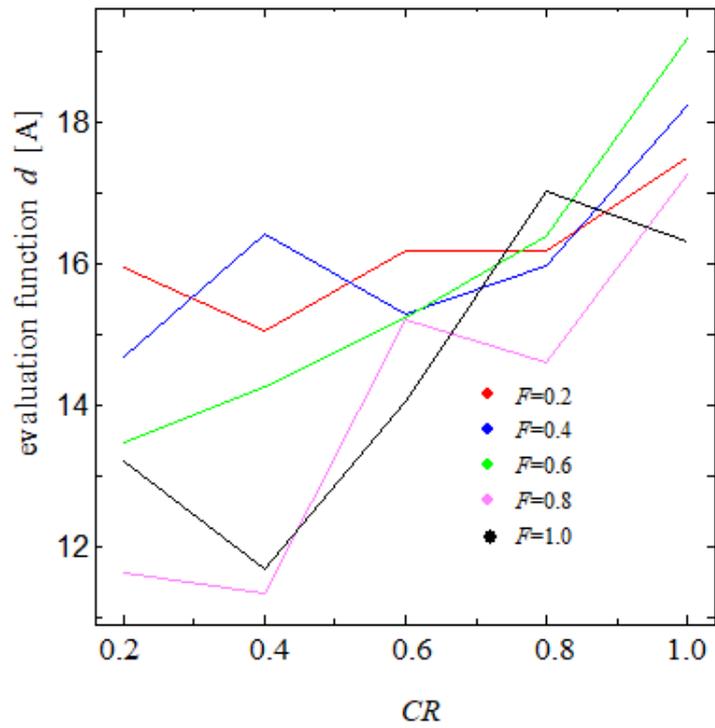


Fig. 3.17 : F 、 CR をそれぞれ変化させた場合の評価関数の変化 (DE/best/1/bin)

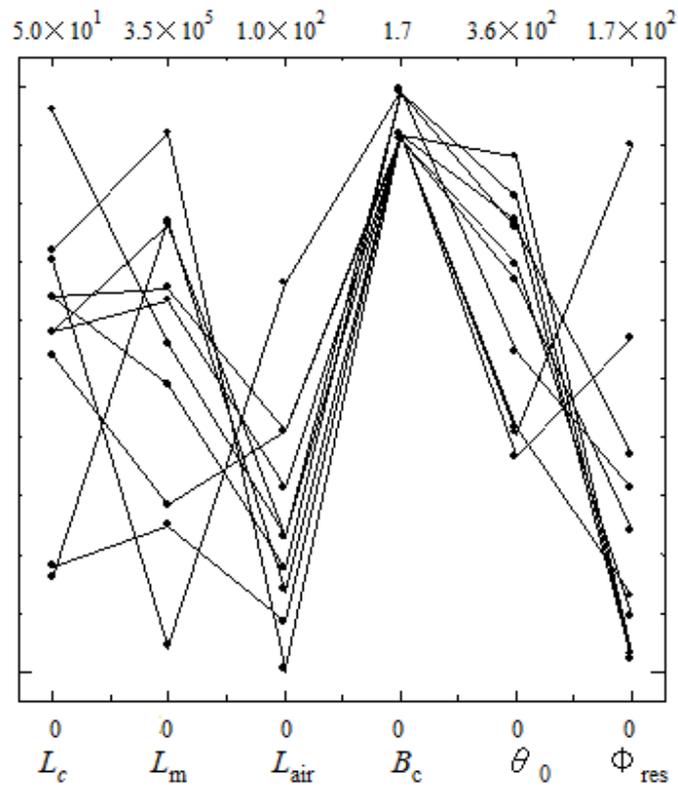


Fig. 3.18 : DE/best/1/bin で求めた機器定数

第4章 結論

今回の目的である GA の代わりに DE を用いることによって、超伝導変圧器の機器定数推定の精度の向上は達成できたと言える。しかし、励磁突入電流波形の測定値と計算値を比較するとまだ誤差があるので、改善するためには簡易磁気特性を使用しているなど簡易的な計算を行っているのも、さらに詳しい式が必要となると考える。

GA と DE の間で精度が大幅に変わったことは探索方法に大きな違いがあるからだと考えられる。GA は常に一定の探索範囲をランダムに探索しているが、DE は差分ベクトルを用いており探索初期では広範囲を、探索終盤では解があると思われる付近に各個体が収束していき、さらにその付近を詳細に探索することができるため、効率が比較的に良く、評価関数、分散度、解の改善速度において GA を上回ることができたと考えられる。さらに、1世代の計算を行う際に DE では計算に用いる個体数が4つであることに対し、GA では全個体と生成した子のすべてを計算する必要があるため、処理時間も大幅にかかってしまう。今回の場合は実行時間の差が5 s 程であったが世代数が大きくなったり、計算が複雑になったときには、処理時間の差がさらに大きくなる。

GA より DE の方が優れた結果が得られたが、DE の交叉率、スケールリングファクターの設定が大切である。適切なパラメータを設定しないと、DE の性能が十分に発揮されない。Fig. 3.6 から分かるように、パラメータによって評価関数に大きな違いが生じており、特にスケールリングファクター F を適切に設定しなければ局所解に陥ってしまい DE の性能に大きく劣化してしまう。

参考文献

- [1] 徳永 義孝「励磁突入電流波形に遺伝的アルゴリズムを適用した超伝導変圧器の機器定数推定」 低温工学 53 巻 1 号 2018 年 17 から 22 ページ
- [2] 徳永 義孝「巻線形状の設計手順を用いて推定した機器定数による二巻線電力用変圧器の励磁突入電流解析」 2008 The Institute of Electrical Engineers of Japan
- [3] 南潤「遺伝的アルゴリズムを用いた超伝導パラメータ推定方法の検討」 九州工業大学情報工学府情報システム専攻論文 (2010)
- [4] 田口拓人「差分進化法を用いた磁束クリープ・フローモデルのパラメータ推定」 九州工業大学情報工学部電子情報工学科卒業論文 (2017)
- [5] T. Matsushita, T. Fujiyoshi, K. Toko and K. Yamafuji, Appl. Phys. Lett. 56 (1990) 2039.
- [6] E. S. Otabe, M. Kiuchi, “Critical Currents in Superconductors”, Fuzambo International (2005) pp71, 89.
- [7] T. Matsushita: Physica C 217 (1993)461.
- [8] 未踏科学技術協会 超伝導科学技術研究会編著 「これ 1 冊でわかる超伝導実用技術」 日刊工業新聞社(2013)
- [9] 超伝導技術の現状と将来展望 Business & Economic Review 1996 年 09 月号

謝辞

私の指導教官である九州工業大学院情報工学研究院電子情報工学研究系エレクトロニクス分野 小田部荘司教授に深くお礼申し上げます。学業の指導はもちろんのことながら、私生活の面で1人の大人、社会人として必要になるスキルや知識を教えていただいたことに感謝します。

また、岡山県立大学情報工学部の徳永義孝准教授にも深くお礼申し上げます。私の研究の助けになる実験データや資料をいただいたことを感謝します。

最後に、小田部研究室メンバーには公私ともに助言をいただくなど大変世話になりました。改めてここに感謝の意を表します。