

電流制約を考慮した
多重ループ運用における最適連系点の導出

令和三年度

三重大学大学院工学研究科 博士前期課程

電気電子工学専攻 電気システム工学講座

石川 駿貴

三重大学大学院 工学研究科

目次

第一章 序論.....	3
1.1 本研究の背景と目的.....	3
1.2 本論文の概要.....	5
第二章 配電システムモデル.....	6
2.1 集中定数を用いた配電システムモデル.....	6
2.2 分布定数回路と見なした配電システムモデル.....	7
第三章 電流制約の検討.....	8
3.1 モデルの選定.....	8
3.2 許容電流について.....	10
3.3 任意の連系時に流れるループ電流.....	11
3.4 ループ電流から求められる電流制約を満たすための線路条件.....	14
3.5 ループ運用時に損失が増加する条件.....	16
第四章 線路損失最小となる任意の連系点.....	18
4.1 需要家負荷の状況に応じた簡易モデルからの最適連系点の導出.....	18
4.1.1 想定する需要家負荷 1.....	18
4.1.2 想定する需要家負荷 2.....	22
4.1.3 想定する需要家負荷 3.....	25
4.2 配電線を二種類と仮定した場合の最適連系点の予測.....	30
第五章 結言.....	36
5.1 研究の成果.....	36
5.2 今後の課題.....	37
参考文献.....	38
付録.....	40
(1) (2)式導出.....	40
(3)式導出.....	43

(11)式導出	48
(13),(14),式導出	49
従来結果及びシミュレーション結果と計算による結果の比較	51
関連論文および口頭発表	53
謝辞	54

第一章 序論

1.1 本研究の背景と目的

現在の配電系統運用における課題の中に以下の2つが挙げられる。まず1つ目として、人口減少や省エネルギー技術・製品の導入の影響により電力需要が減少傾向にあるため、運用コスト低減を意識した高効率な運用が必要とされている。2つ目の課題は分散型電源の系統連系による影響への対応である。近年、環境問題やエネルギー自給率問題を背景として太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーを用いた分散型電源の導入が進められており、この分散型電源による余剰電力の逆潮流が原因で系統電圧の上昇や変動が生じ、適正電圧逸脱などの問題がある。このため分散型電源の系統連系時も系統電圧を適正值になるように管理していくことが必要とされている。

配電系統の構成方式には、放射状方式とループ状方式がある。配電系統には放射状方式が主に採用されており、建設費が安価であるといったメリットがある。放射状配電系統では元々構成されている状態からの再構成により損失を改善する研究が行われている[1]-[5]。文献[1]では配電制約を満たしながら短時間で最適解を算出する手法を提案し、文献[2]では、HSA(Harmony Search Algorithm)、文献[3][4]では、粒子群最適化(PSO)による損失最小化を提案している。また、文献[5]では、新規の負荷に対しフィーダを新設することにより損失最小化を図る。対して、ループ状方式はフィーダ間を連系している開閉器を常時閉として運用する方式である。ここでの開閉器は放射状配電系統の経路を変更する場合に用いられる。配電系統をループ状方式で運用を行うと、ループ点をつなぐだけで両端フィーダの電圧差が抑制され、電流値の差もバランス化されることで過負荷抑制や線路損失低減が成される。よって将来的な配電系統ではループ状方式での運用の方が課題点の解決につながると考えられるので、我々はループ状方式での運用に注目する。

ループ状方式の中でも、二フィーダ間のループによる運用[6][7][8]と、同バンク内に複数のループを有する多重ループ(メッシュ)状による運用に分けられる。文献[6]では再生可能エネルギー電源が大量かつ不均等に導入された場合の配電系統を対象に、負荷の急変に対してもループ状方式では電圧が適正範囲内に収まることを確認している。また文献[7][8]のようにFACTS機器であるUPFC(Unified Power Flow Controller)を用いたものがある。我々の研究は、ループ状配電系統の構成のみでの線路損失の低減をできる限り目指し、それが難しい場合にはUPFCを導入する方針である。そこで、電圧分布の改善等さらなる効率的な運用の可能性がある多重ループでの運用に注目した。

多重ループ運用に関する研究[9]-[13]においても、主目的が異なるものがある。文献[9]では分散型電源の普及を、文献[10]ではマイクログリッドの信頼性向上を目的とし、副次的効果として損失が削減できることを示している。多重ループ運用であり、尚かつ損失最小化に関する文献[11]では連系点を末端に固定し UPFC による損失の改善を想定している。文献[12]では負荷の変動を考慮し分散型電源の最適な配置場所及びサイズを決定する。また文献[13]では多重ループ運用の下で、季節ごとの負荷変動を考慮し D-STATCOM (Static Synchronous Compensator for Distribution Network)の最適な配置場所を決定している。しかし、文献[11][12][13]はいずれも特定のループ点に対する検討となっている。対象の系統に応じてメッシュ化する方が、機器を用いて系統を強化するよりも安価になり得る[9]ことから、我々は対象とする系統の条件に対応したループ点の導出を行う。

本研究では膨大な連系点の中から線路損失の低減に最も効果的なループ点を導出することで、既存の配電系統から多重ループ配電系統に構成することを研究目的としている。

1.2 本論文の概要

本論文は、以下のように構成される。

第二章では、従来の配電システムに関する研究で多く用いられてきた配電システムモデルに加えて計算を簡易化するための分布定数回路と見なした配電モデルについて述べる。

第三章では、ループ運用を想定する際に必須となる配電線の許容電流及び、ループ運用時においても許容電流以下となるための条件について述べる。

第四章では、第三章で算出した条件内で線路損失最小となる連系点の導出方法及び線路条件が複雑化した場合における最適連系点の予測方法について述べる。

第五章では、本研究で得られた成果と今後の課題について述べる。

第二章 配電システムモデル

2.1 集中定数を用いた配電システムモデル

本研究では配電システムモデルとして, Figure 1 に示すように同一の配電用変電所 E から電力が供給される 3 本のフィーダ A,B,C を想定する。3 本のフィーダ A,B,C は 10 区間に分けられており, 全ての区間に線路インピーダンス, 需要家負荷及び連系点が存在する。また, パラメータは集中定数として与え, 線路インピーダンス \hat{Z} は抵抗とインダクタンスから $\hat{Z} = R + jX[\Omega]$ として表される

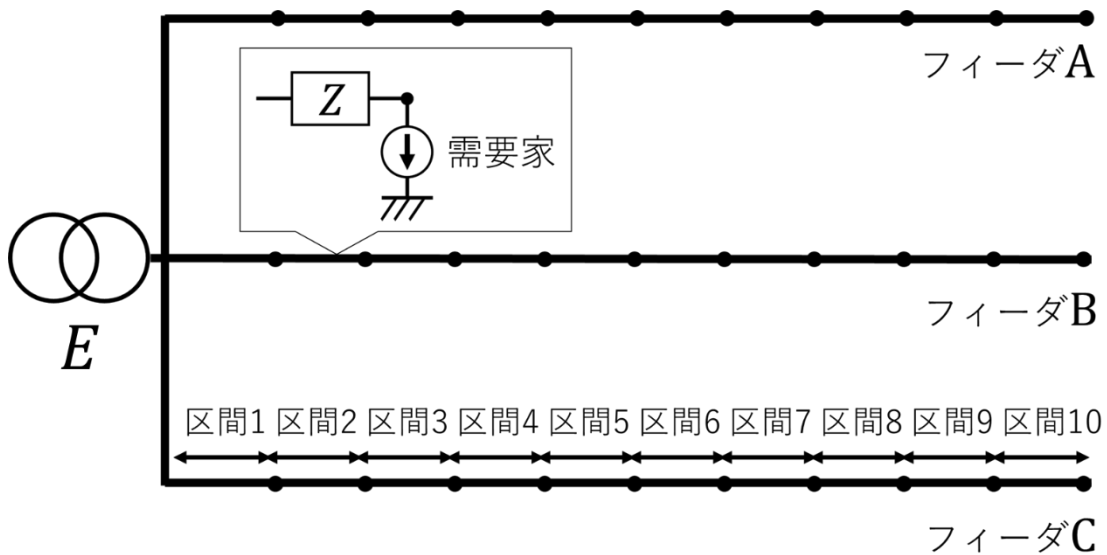


Figure 1 配電システムモデル

2.2 分布定数回路と見なした配電系統モデル

Figure 1 に示した配電系統モデルは集中定数モデルであり,配電線の距離が 10 区間という離散的値で表されている。離散的値のため数学的処理が困難となるため,微分などの計算を行うためのモデルとして分布定数モデルも用いていく。それぞれのフィーダでの線路インピーダンスと線路長 l は同一とする。配電系統モデルでの線路インピーダンスは抵抗とインダクタンス, 需要家負荷は電流源で表現し, パラメータを分布定数として与える。線路インピーダンスは線路上の微小区間 Δx 内に均一に分布することとし, $\hat{Z} = R + jX[\Omega/km]$ とする。また需要家負荷も同様に線路上に均一に分布することとし, フィーダ A,B,C それぞれ $I_A(x), I_B(x), I_C(x)[A/km]$, (ここで x は変電所から任意の距離を示す)とする。ここで分布定数モデルを Figure 2 に示す。

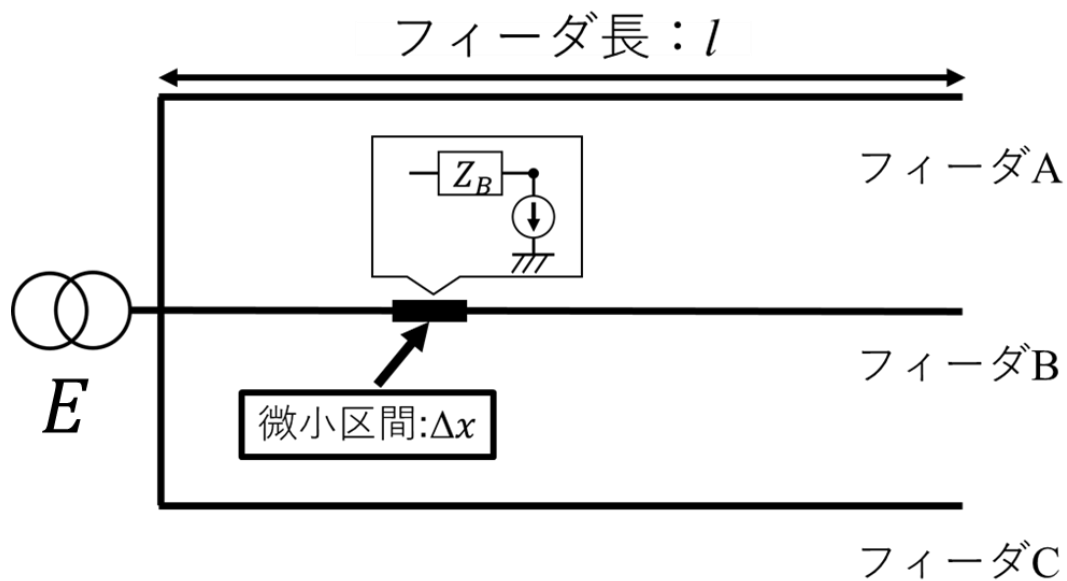


Figure 2 分布定数モデル

第三章 電流制約の検討

3.1 モデルの選定

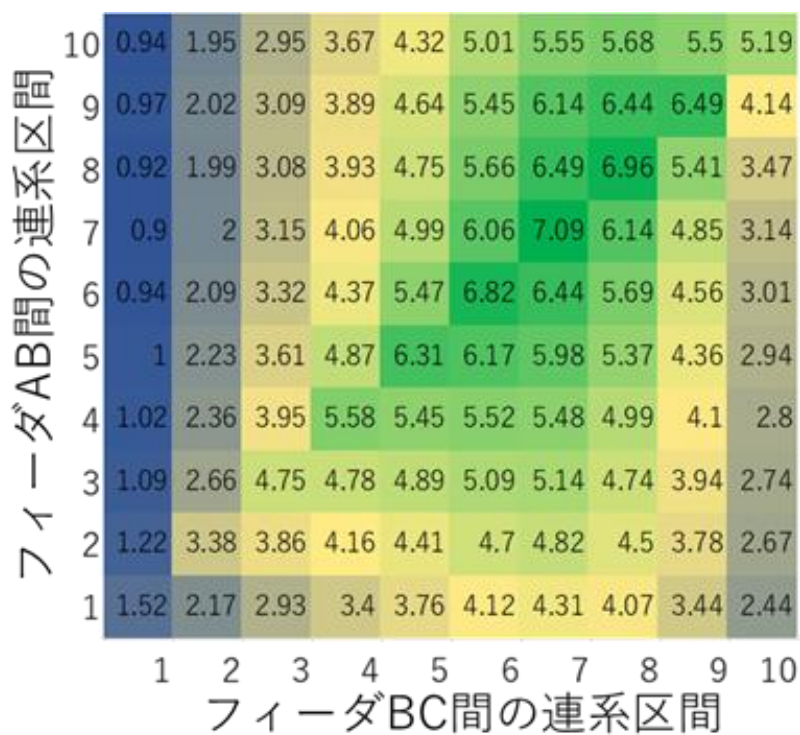
実際の需要家負荷は一定の電力を供給するように動作しているが、先行研究[3]では、電流源を用いて特定の条件下では最適連系点が負荷電流のバランスに依って決まることを示した。しかし、電力源と電流源を用いる場合において、得られる結果に差異がどの程度あるのかが未検討であった。そこで、電力源と電流源を用いた場合の結果を比較し得られる解析結果にどの程度の差異が生じるのかをシミュレーションを行い検討した。シミュレーションパラメータを Table 1 に示し、また比較結果を Figure 3 に示す。この結果では各マス目に各連系パターンの低減率[%]を示す。ここで、電力源は受電端電圧が 6600V である時に Table 1 に示す電流値となるように設定した。

Figure 3 の結果では、電流源を用いた結果(a)と電力源を用いた結果(b)が低減率は異なるが最適連系点については同等の結果を得られている。このことから、電流源を用いた解析と電力源を用いた解析結果に大きな差異はないと考えられる。

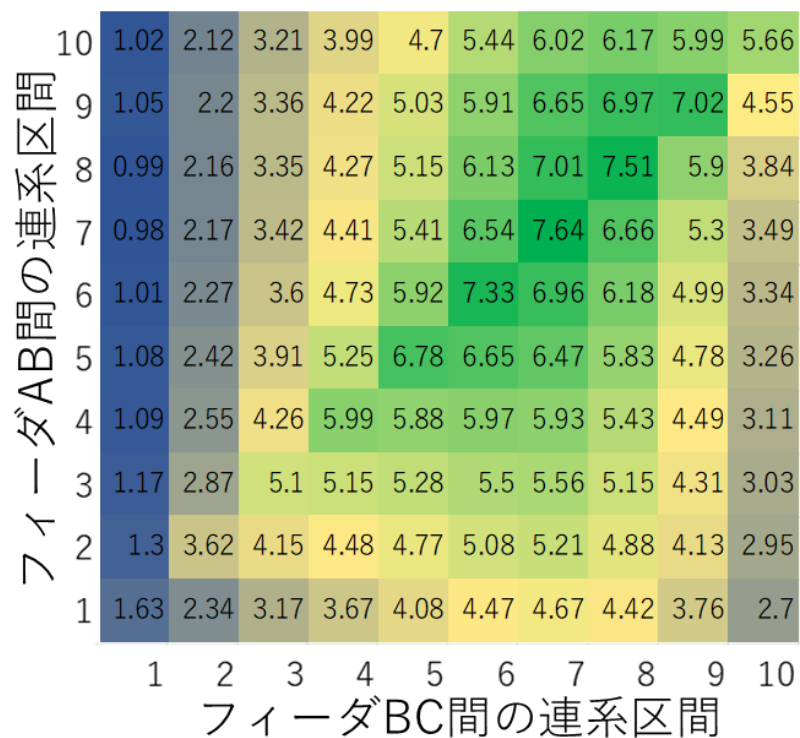
ループした際に流れるループ電流の値を比較したところ差は 1%程度と小さな値でありこれについては電力源を用いた方が大きな値となることが多かった。しかし、差が小さいことや電力源を用いた解析が複雑となることから本報告書では解析が容易な電流源を対象に検討を進める。

Table 1 シミュレーションパラメータ

		区間1	区間2	区間3	区間4	区間5	区間6	区間7	区間8	区間9	区間10
フィーダA	R[mΩ]	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
	L[mΩ]	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	I[A]	3	12	23	30	27	30	28	30	22	17
フィーダB	R[mΩ]	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
	L[mΩ]	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	I[A]	6	16	20	22	26	24	25	24	21	16
フィーダC	R[mΩ]	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
	L[mΩ]	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	I[A]	6	19	27	35	32	35	35	35	32	32



(a) 電流源による結果



(b) 電力源による結果

Figure 3 比較結果

3.2 許容電流について

通常時、配電線に流せる電流には Table 2 に示すように許容値がある。ループ前にその許容範囲内で運用されていた配電線が、ループ運用することにより許容を超える可能性がある。そのため、ループ運用時においても電流の許容範囲内となるよう条件の下でループ運用するべきだと考えられる。そこで、ループ運用することによって流れるループ電流を導出し、そのループ電流からループ運用が可能な配電線の条件を考える。

Table 2 電流の許容

○高圧架空線（銅線）

電線種類	抵抗 [Ω /km]	インダクタンス [Ω /km]	運用電流 [A]	備 考
OC-W 125	0.149	0.381	420	太い電線（断面積 125 mm ² の電線） 変電所近くなど大電流箇所で使用
OC-W 60	0.313	0.409	240	中間の電線（断面積 60 mm ² の電線） 変電所から離れ電流が小さい箇所で使用
OE 5	0.932	0.461	70 程度	細い電線（直径 5 mm の電線） 配電線末端など枝部分で使用

3.3 任意の連系時に流れるループ電流

本研究では最適な連系パターンの数式的な導出として、配電系統モデルにて任意の連系を行った場合を考える。ただし、任意の連系は3フィーダ間で2本とし、同一のフィーダ間での連系は1本のみとする。Figure 4のようにフィーダA,B間において区間 n 、フィーダB,C間において区間 m の位置で連系した場合を想定する。この任意の連系を行ったことによる連系前後での線路損失の低減率を変数 n と m の関数として算出し、式の大きさが最も高くなる時の n と m の組み合わせを式から導出することで最適な連系パターンの導出を行う。では次に任意の連系を行ったことによる連系前後での線路損失の低減率の算出手順について示す。任意の連系時に流れるループ電流はFigure 5に示すように流れる。これを数式として表すと以下ようになる。詳細な導出過程については付録に記載する。

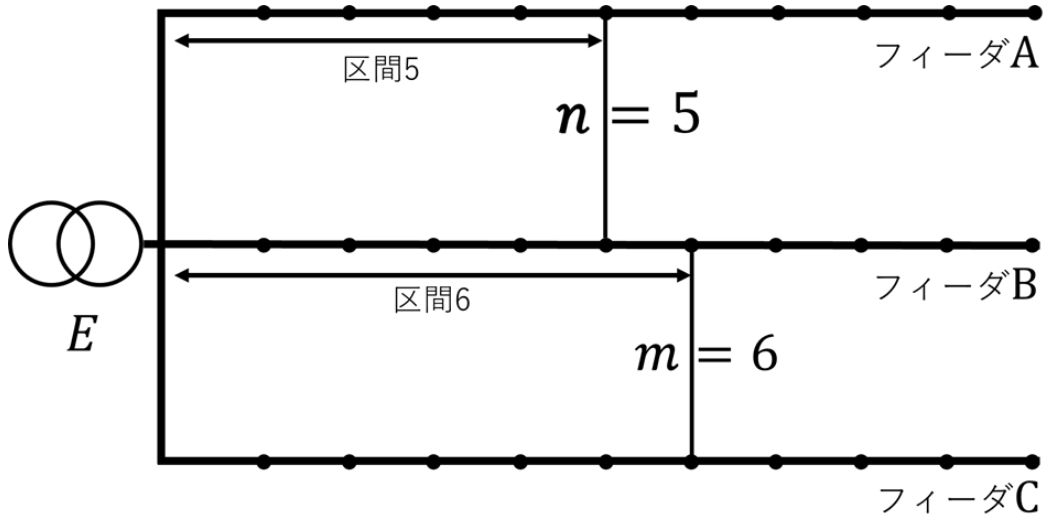


Figure 4 任意の連系

$$I_{bc} = \frac{\sum_{k=1}^m (Z_{Ck} I_{Ck}) - (\sum_{k=1}^n Z_{Bk} I_{ab}) - (\sum_{k=1}^m Z_{Bk} I_{Bk})}{\sum_{k=1}^m Z_{Ck} + \sum_{k=n}^m Z_{Bk} + \frac{(\sum_{k=1}^n Z_{Bk})(\sum_{k=1}^n Z_{Ak})}{\sum_{k=1}^n Z_{Bk} + \sum_{k=1}^n Z_{Ak}}} \quad (1)$$

$$I'_{ab} = \frac{\sum_{k=1}^n Z_{Bk} I_{Bk} - \sum_{k=1}^n Z_{Ak} I_{Ak}}{\sum_{k=1}^n Z_{Ak} + \sum_{k=1}^n Z_{Bk}} + \frac{(\sum_{k=1}^n Z_{Bk})(\sum_{k=1}^n Z_{Ak})}{\sum_{k=1}^n Z_{Bk} + \sum_{k=1}^n Z_{Ak}} I_{bc} \quad (2)$$

このとき RL の値が全フィーダの全区間で同一の値である場合次のように低減量 P_2 を表すことができる。ここで低減量 P_2 は放射状時の線路損失 P から多重ループ運用時の線路損失 P_{loop} を差し引いた値であり、この低減量 P_2 が大きいほどループ時の損失削減効果が大きいことを示す。加えて低減量 P_2 を放射状時の線路損失 P で除算することで損失低減率が得られる。

$$P_2 = \left(\frac{2R}{4m-n} \right) \left(\left(\sum_{k=1}^n I_{Bk} - \sum_{k=1}^n I_{Ak} \right)^2 \left(\frac{m}{n} \right) + \left(\sum_{k=1}^m I_{Ck} - \sum_{k=1}^m I_{Bk} \right)^2 \right. \\ \left. + \left(\sum_{k=1}^m I_{Ck} - \sum_{k=1}^m I_{Bk} \right) \left(\sum_{k=1}^n I_{Bk} - \sum_{k=1}^n I_{Ak} \right) \right) \quad (3)$$

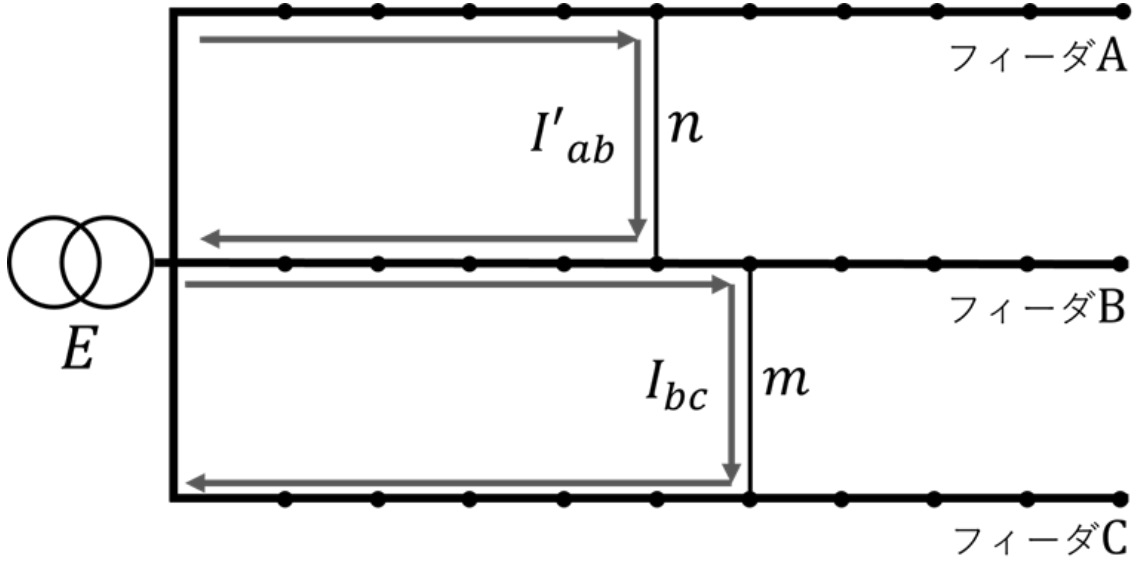


Figure 5 ループ電流

Figure 2 の分布定数モデルにおいて上記の導出を行うと,以下のようになる。

$$I_{bc} = \left\{ \int_0^m Z_C(x) I_C(x) dx + I_{ab} \int_0^n Z_B(x) dx - \int_0^m Z_B(x) I_B(x) dx - \int_0^m Z_B(x) I_B(x) dx \right\} \\ \times 1 / \left\{ \int_0^m Z_C(x) dx + \int_n^m Z_B(x) dx + \frac{(\int_0^n Z_A(x) dx)(\int_0^n Z_B(x) dx)}{\int_0^n Z_A(x) dx + \int_0^n Z_B(x) dx} \right\} \quad (4)$$

$$I'_{ab} = \frac{\int_0^n Z_B(x) I_B(x) dx - \int_0^n Z_A(x) I_A(x) dx}{\int_0^n Z_A(x) dx + \int_0^n Z_B(x) dx} + \frac{(\int_0^n Z_B(x) dx)}{\int_0^n Z_A(x) dx + \int_0^n Z_B(x) dx} I_{bc} \quad (5)$$

$$P_2 = \frac{2R}{4mn - n^2} \left\{ m \left(\int_0^n I_B(x) dx - \int_0^n I_A(x) dx \right)^2 - n \left(\int_0^m I_C(x) dx - \int_0^m I_B(x) dx \right) \right. \\ \left. \times \left(\int_0^n I_A(x) dx - \int_0^n I_B(x) dx \right) + n \left(\int_0^m I_C(x) dx - \int_0^m I_B(x) dx \right)^2 \right\} \quad (6)$$

次章からこのループ電流を用いて制約条件及び最適連系点を求めていく。

3.4 ループ電流から求められる電流制約を満たすための線路条件

今回は抵抗及びインダクタンスの値をすべて一定とした条件において区間 4, フィーダ全長の変電所側から 40% の位置において配電線に流れる電流の大きさが 240[A] 以下となる条件を想定する。式(4)(5)及び Table 2 から, ループ後に満たすべき条件は以下のよう
に定まる。これは, ループ後の位置 x において流れる電流の大きさが 240A 以下であることを示す。

$$\begin{pmatrix} |I'_{ab} + I_A(x)| \\ |I_{bc} - I'_{ab} + I_B(x)| \\ |I_{bc} + I_C(x)| \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} 240 \\ 240 \\ 240 \end{pmatrix} \quad (7)$$

ここで, I'_{ab}, I_{bc} ループ電流を示し $I_A(x), I_B(x), I_C(x)$ は分布定数モデルにおいて変電所からの距離 x の位置においてループ前に流れている電流(線路電流)を示している。この線路電流はフィーダ ABC それぞれに対して次の三つの式で与えられていると想定する。

$$I_A(x) = -Ax + Al \quad (8)$$

$$I_B(x) = -Bx + Bl \quad (9)$$

$$I_C(x) = -Cx + Cl \quad (10)$$

加えてループ電流の値を, $n = 1, m = 1$ の位置において連系した際に流れるループ電流の値を想定する。この変電所に近い側で連系することによりループ電流の値に関しては大きな値となる。上の三つの式及び連系箇所を固定した場合のループ電流の値を用いて式(7)を変形すると次のようになる。これも詳細な導出過程については付録に記載する。

$$\begin{pmatrix} 1 & 19 & 19 \\ -\frac{1}{30} & \frac{19}{60} & \frac{19}{60} \\ 1 & 19 & 19 \\ -\frac{1}{30} & \frac{19}{60} & \frac{19}{60} \\ 1 & 19 & 19 \\ -\frac{1}{30} & \frac{19}{60} & \frac{19}{60} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Al \\ Bl \\ Cl \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} 240 \\ 240 \\ 240 \end{pmatrix} \quad (11)$$

この式(11)をグラフ化すると Figure 6 のようになる。

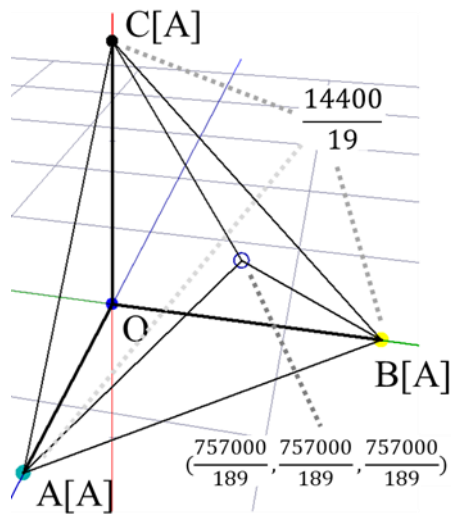


Figure 6 根元電流の許容値をグラフ化

Figure 6 より簡易的条件として,3 フィーダの根元に流れる電流の合計値が 720[A]以下であれば良い,ということが分かる。

3.5 ループ運用時に損失が増加する条件

$n \leq m$ の制約の中でループすることを考える。ループした際に流れるループ電流はフィーダ A からフィーダ B に流れ、またフィーダ B からフィーダ C に流れる状態を想定する。この状況は以下の式のように各フィーダの電圧降下の大小関係で表すことができる。

$$Z_a I_a \leq Z_b I_b \leq Z_c I_c \quad (12)$$

この状況において、以下の二つの条件をどちらも満たすとき、ループすることによって損失が低減することなく、反対に損失が増加してしまう。これについても詳細な導出過程については付録に記載する。

条件 1

$$I_{bc} \geq I'_{ab} \quad (13)$$

条件 2

$$\frac{I'_{ab}}{I_{bc}} \sum_{k=1}^m R_{Ak} I_{Ak} \geq \sum_{k=1}^m R_{Ck} I_{Ck} \quad (14)$$

条件 1 を(1)式,(2)式を用いて式変形すると以下ようになる。

$$\frac{\sum_{k=1}^n Z_{Bk} I_{Bk} - \sum_{k=1}^n Z_{Ak} I_{Ak}}{\sum_{k=1}^n Z_{Ak} + \sum_{k=1}^n Z_{Bk}} \geq \frac{(\sum_{k=1}^n Z_{Ak})(\sum_{k=1}^m Z_{Ck} I_{Ck} - \sum_{k=1}^m Z_{Bk} I_{Bk})}{(\sum_{k=1}^m Z_{Ck} + \sum_{k=1}^m Z_{Bk})(\sum_{k=1}^n Z_{Ak} + \sum_{k=1}^n Z_{Bk})} \quad (15)$$

上式は、 $\sum_{k=1}^n Z_{Ak} \leq \sum_{k=1}^m Z_{Ck}$ であり、尚且つループ点のフィーダ AB 間の電位差がループ点のフィーダ BC 間の電位差より大きい場合に確実に成り立つ。

条件 2 については以下のように書き換えることができる。

$$\sum_{k=1}^n R_{Ak} I_{Ak} \geq \sum_{k=1}^m R_{Ck} I_{Ck} \quad (16)$$

元々の前提条件として、各フィーダの電圧降下の大小関係はフィーダ A < フィーダ B < フィーダ C という前提で考えていた。その中で上式を満たすことができるのは、インピーダンスの大小関係と、抵抗値の大小関係が逆転している状態である。このような状態である場合にはループしないほうが良いと考えられる。

第四章 線路損失最小となる任意の連系点

本研究では配電系統内で多重ループ運用を行う場合において最適となる連系のパターンを数式的に導出する手法についても検討を行う。ここでは線路損失の低減量を評価値とし、線路損失の低減量が最も高い連系パターンを最適であるとする。次章から需要家負荷や使われる配電線の状況を仮定し、その中で低減量が最も高くなる最適な連系パターンを数式から導出していく。

4.1 需要家負荷の状況に応じた簡易モデルからの最適連系点の導出

Figure 1 において抵抗 $R[\Omega]$ とインダクタンス $X[\Omega]$ の値が一定であるという条件で考える。これは Table 2 に示す配電線において、断面積が 60mm^2 の配電線のみを用いた場合を想定している。 60mm^2 を選んだ理由としては、 5mm の物については末端かつ需要家の少ないところでのみ使われ、この電線の箇所でループ運用しても損失を削減され難い。また 125mm^2 については変電所近くで使われる。よって最も多く使われる 60mm^2 を対象にすれば良いのではないかと考えた。

線路インピーダンスについては決定したが、需要家負荷については様々な状況が考えられる。そこで、いくつかの需要家負荷の状況によって場合分けを行い検討していく。

4.1.1 想定する需要家負荷 1

一つ目の状況として Table 3 に示すように需要家負荷が均等に存在しており需要家負荷の大小関係はフィーダ $A > \text{フィーダ } B > \text{フィーダ } C$ という状況を想定する。この場合、線路電流は Figure 7 のようになり、この線路電流は(8)(9)(10)式と同一の式で表すことができる。Table 3 に示すように需要家負荷が均等である場合フィーダ B の電流を基準にフィーダ A, C はフィーダ B の需要家負荷の定数倍と考えられる。今回は仮に、 $I_B(x) = -ax + b$ 、 $I_A(x) = k_a I_B(x)$ 、 $I_C(x) = k_c I_B(x)$ と仮定する。また(6)式は $n \leq m$ という条件で導出している。よって(6)式を微分して得られる以下の式が常に正となる場合最適連系点は、 n の最大値である $n = m$ となる。以下に(6)式を微分した式を示す。

Table 3 需要家負荷の値 1

需要家負荷電流	区間1	区間2	区間3	区間4	区間5	区間6	区間7	区間8	区間9	区間10
フィーダA	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
フィーダB	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
フィーダC	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

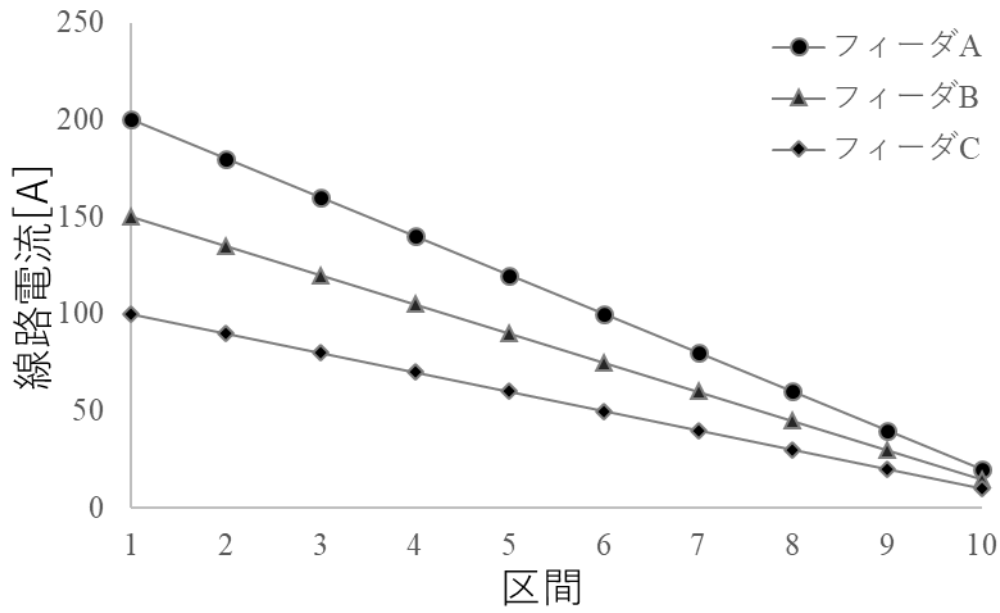


Figure 7 線路電流

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial n} P_2 = & \left(\frac{2R}{4m-n} \right) \left\{ \frac{2m(k_a-1)^2}{n} (b-an) \left(bn - \frac{an^2}{2} \right) - m(k_c-1)(k_a-1)(b-an) \right. \\
& \times \left(b - \frac{am}{2} \right) \Big\} + \left(\frac{2R}{4m-n} \right)^2 \left\{ -mn(k_c-1)(k_a-1) \left(b - \frac{an}{2} \right) \left(b - \frac{am}{2} \right) \right. \\
& \left. + \frac{n(k_a-1)^2}{n} \left(bn - \frac{an^2}{2} \right)^2 + \left(bm - \frac{am^2}{2} \right)^2 (k_c-1)^2 \right\}
\end{aligned} \tag{17}$$

ここで、 $b \geq am$, であることから $(k_a - 1)(k_c - 1)$ が負であれば、上式は常に正となる。よって上式が常に正となる条件は次のようになる。

$$(k_a - 1)(k_c - 1) \leq 0 \quad (18)$$

今回需要家負荷の大きさがフィーダ A > フィーダ B > フィーダ C という状況を想定しているため、最適連系点は $n = m$ となること分かる。最適連系点が $n = m$ となる時、(6)式に $n = m$ を代入することで最適連系点が求まる。代入すると次のようになる。

$$P_2 = \frac{2R}{3n} \left(\int_0^n I_B(x) dx \right) \{ (k_a - 1)^2 - (k_c - 1)(k_a - 1) + (k_c - 1)^2 \} \quad (19)$$

この式から $(\int_0^n I_B(x) dx)/n$ が最大となる n を求めることで最適連系点が求まる。フィーダ B の電流が(9)式のように表されているとき、 $(\int_0^n I_B(x) dx)/n$ が最大となる n は $n = \frac{2}{3}$ となる。よって、需要家負荷が均等に存在しており需要家負荷の大小関係はフィーダ A > フィーダ B > フィーダ C という状況における最適連系点は

$$n = m = \frac{2}{3}l \quad (20)$$

となる。

これをシミュレーションにおいても成り立つか確認する。Table 3 の値を用いてシミュレーションを行い、シミュレーション結果を Figure 8 に示す。(20)式は分布定数回路により求めた値であるが、分布定数ではシミュレーションを行うことができないため、シミュレーションは集中定数回路で行う。分布定数のフィーダ長さは集中定数の区間に対応し、全長 l が区間 10 に対応する。

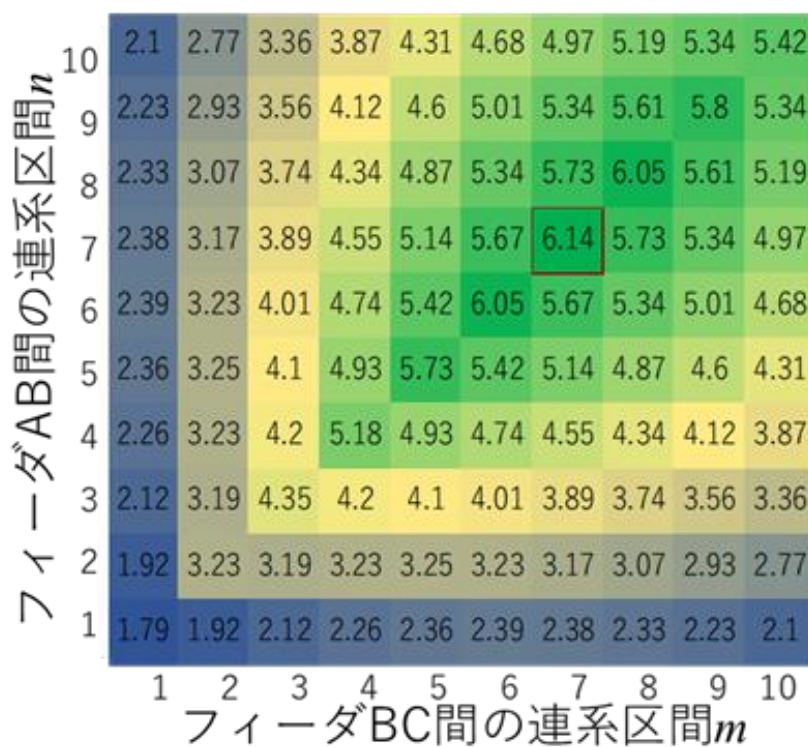


Figure 8 シミュレーション結果

Figure 8 のシミュレーション結果より,最適連系点 7-7 になっており(20)式とおおむね一致していることがわかる。

4.1.2 想定する需要家負荷 2

二つ目の状況として Table 4 のように需要家負荷が配電線末端に集中して存在しており、電流の大小関係はフィーダ A>フィーダ B>フィーダ C という状況を想定する。この場合の線路電流は Figure 9 のようになる。

Table 4 需要家負荷の値

需要家負荷電流	区間1	区間2	区間3	区間4	区間5	区間6	区間7	区間8	区間9	区間10
フィーダA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	200
フィーダB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	150
フィーダC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100

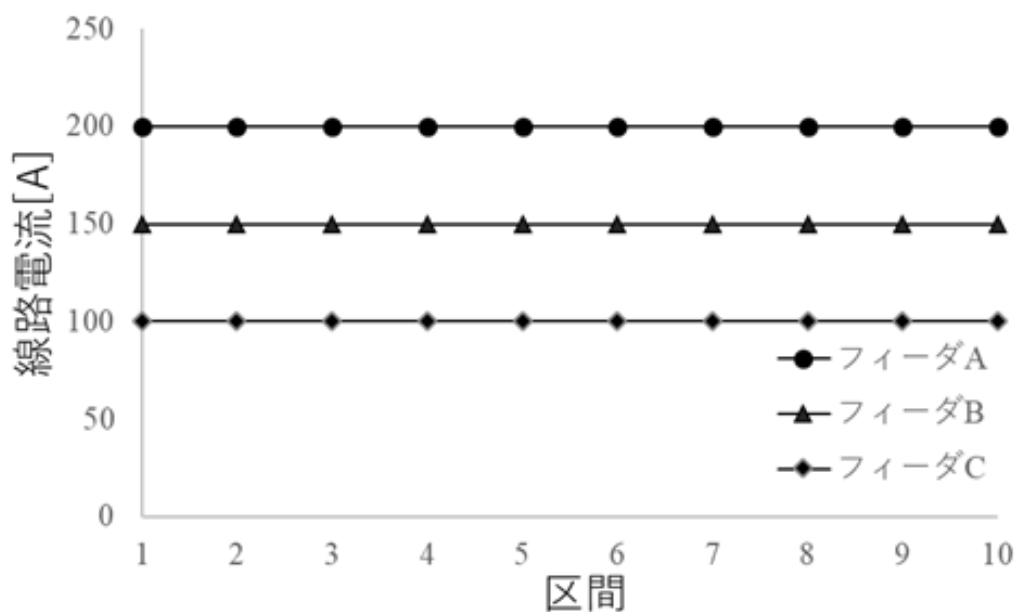


Figure 9 線路電流

Table 4 に示すように需要家負荷が末端に集中している場合フィーダ B の電流を基準にフィーダ A,C はフィーダ B の需要家負荷と定数の和と考えられる。この時の最適連系点は(6)式のフィーダ A,C の項をフィーダ B の需要家負荷と定数の和に置き換えることで求まる。

今回は $I_A(x) = I_B(x) + Sa$, $I_C(x) = I_B(x) - Sc$ と仮定し,置き換えた式を以下に示す

$$P_2 = \frac{2R}{4m-n} \left\{ \frac{m}{n} \left(\int_0^n -Sa \, dx \right)^2 + \left(\int_0^m -Sc \, dx \right) \times \left(\int_0^n -Sa \, dx \right) + \left(\int_0^m -Sc \, dx \right)^2 \right\} \quad (21)$$

この式より n または m が大きければ大きいほど低減率が大きくなることがわかる。加えて分母部分が最小となるのは $n = m$ の時である。

よって、需要家負荷が末端に集中しており,また需要家負荷の大小関係がフィーダ A > フィーダ B > フィーダ C という状況における最適連系点は

$$n = m = l \quad (22)$$

となる。

これをシミュレーションにおいても成り立つか確認する。Table 4 に示す値を用いてシミュレーションを行い,シミュレーション結果を Figure 10 に示す。

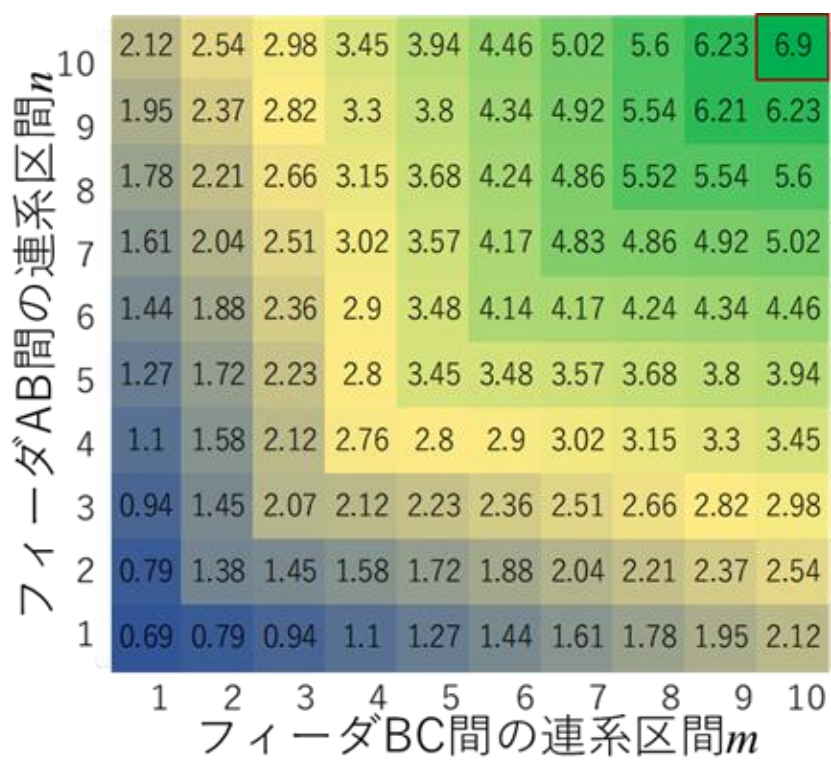


Figure 10 シミュレーション結果

Figure 10 のシミュレーション結果より(22)式で示した位置と一致することがわかる。

4.1.3 想定する需要家負荷 3

三つ目の状況としてフィーダ ABC の根元の線路電流の大小関係はフィーダ A>フィーダ B>フィーダ C となっているが配電線末端では大小関係が変化している場合を想定する。一例として Table 5 のような需要家負荷を想定する。この場合の線路電流は Figure 11 に示すような形となる。

Table 5 需要家負荷の値

需要家負荷電流	区間1	区間2	区間3	区間4	区間5	区間6	区間7	区間8	区間9	区間10
フィーダA	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
フィーダB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	150
フィーダC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100

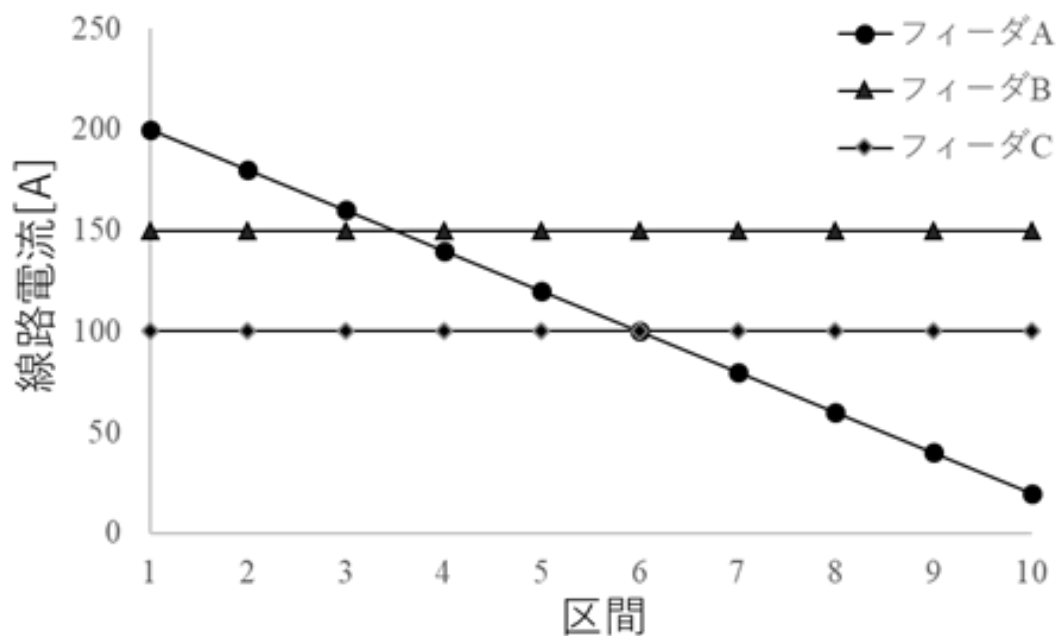


Figure 11 線路電流

フィーダ AB 間の連系点について(6)式にフィーダ B,C の値を代入した以下の式より求まる。ここで、フィーダ B,C の差を S とする。

$$P_2 = \frac{2R}{4mn - n^2} \left\{ m \left(\int_0^n I_B(x) dx - \int_0^n I_A(x) dx \right)^2 + nmSa \left(\int_0^n I_A(x) dx - \int_0^n I_B(x) dx \right) + n(-mSa)^2 \right\} \quad (23)$$

式の, $(\int_0^n I_A(x) dx - \int_0^n I_B(x) dx)$, という部分は正の値かつ絶対値が大きければ大きいほど上式の, $(\int_0^n I_A(x) dx - \int_0^n I_B(x) dx)$, という部分は正の値かつ絶対値が大きければ大きいほど低減率が大きくなることがわかる。よって Figure 11 の線路電流の大小関係よりフィーダ A > フィーダ B となっている部分の内, 最も末端側に近い箇所で連系することにより, 最も大きな低減率を得ることができる。

ただし, フィーダ A の線路電流とフィーダ B の線路電流の交点の位置が, フィーダ A の根元電流の大きさの約 58.6% よりも小さければ成り立つことは確認したが, それ以上の場合については成り立つことが保証できない。

今回一例として, フィーダ B,C の需要家負荷を末端に集中させた状態を想定したが, この状態以外においてもフィーダ ABC の根元の線路電流の大小関係がフィーダ A > フィーダ B > フィーダ C という状態であれば, 線路電流の交差する箇所で連系することにより最も大きな低減率を得ることができる。ただし, [4.1.2]で示したような需要家負荷が定数倍の関係性である場合, 線路電流の交点の位置を 2/3 倍した箇所が最適連系点になると予想される。これをシミュレーションにおいても成り立つか確認する。Table 5 に示す値を用いてシミュレーションを行い, シミュレーション結果を Figure 12 に示す。

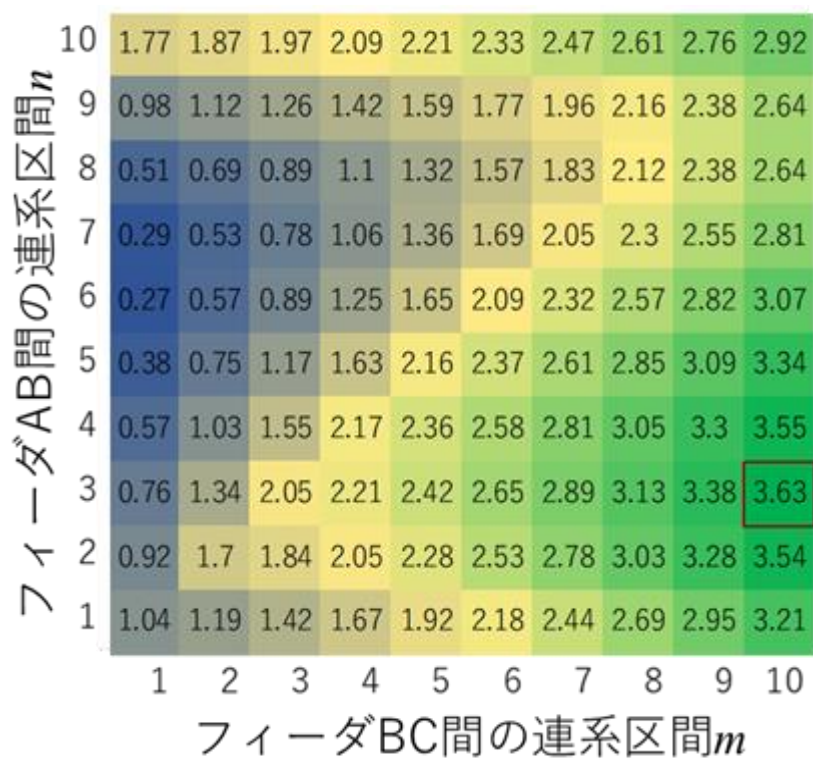


Figure 12 シミュレーション結果

また,3 フィーダが交差している状況についてもシミュレーション結果を示す。シミュレーションパラメータを Table 6 にシミュレーション結果を Figure 13 に示す。

Table 6 シミュレーションパラメータ

需要家負荷電流	区間1	区間2	区間3	区間4	区間5	区間6	区間7	区間8	区間9	区間10
フィーダA	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
フィーダB	15	15	15	15	15	15	15	15	15	30
フィーダC	10	10	10	10	10	10	10	10	10	40

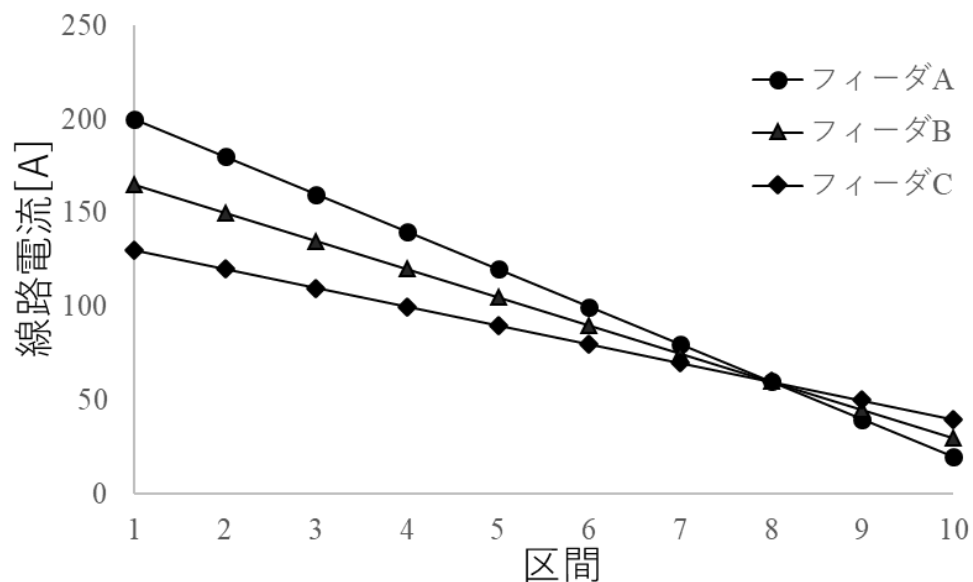


Figure 13 線路電流

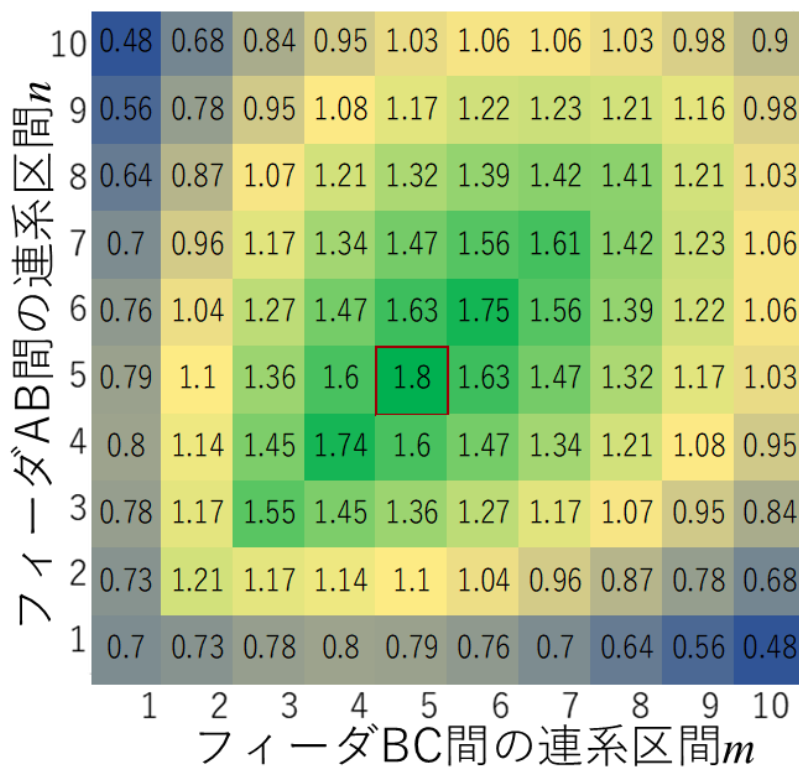


Figure 14 シミュレーション結果

シミュレーション結果より,線路電流が交差する箇所付近が最適連系点となっていることがわかる。

4.2 配電線を二種類と仮定した場合の最適連系点の予測

次に非限定的条件として、 RL が一定でない場合を想定する。ここでは一例として、配電線の種類が二種類の場合を想定する。Table 2 に示す、配電線の 125mm^2 及び 60mm^2 のインピーダンスを用いた場合を想定する。

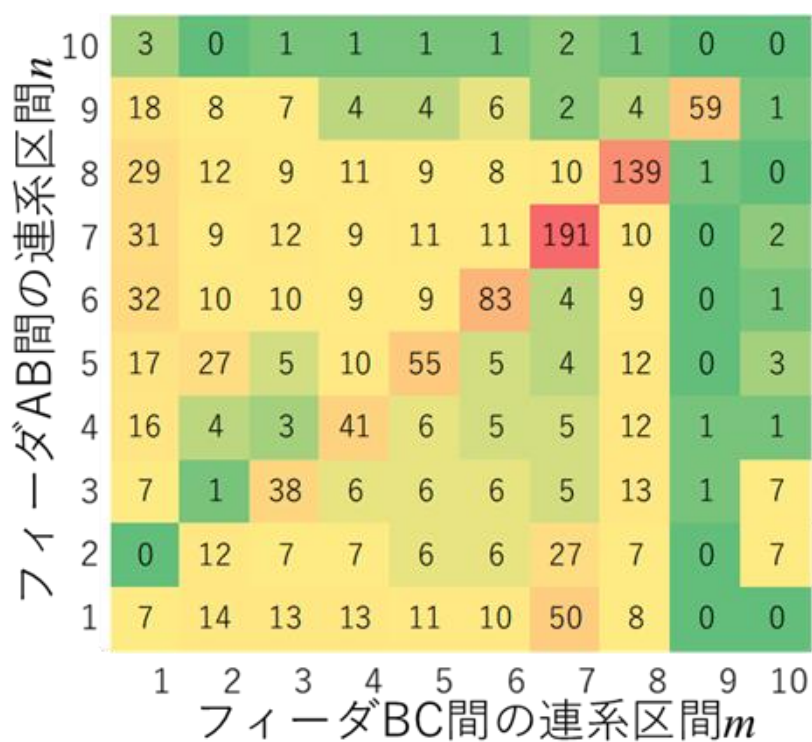
[4.1]では、線路電流を基準に最適連系点を数式から導出したが [4.1]では抵抗及びインダクタンスを全フィーダの全区間で一定であるとしたため、抵抗等が一定でない場合には成り立たない。加えて抵抗等が一定でない場合数式から最適連系点を導出することが非常に困難となる。そこでまず抵抗等が変化することによる最適連系点となる位置が変化するのか、またどのように変化するのかを確認するためのシミュレーションを行う。

シミュレーション条件として需要家負荷が均一に存在している場合を想定する。配電線については Table 7 に示すように最大二種類の配電線が使われ末端から細い配電線に置き換わることを想定する。今回、配電線は変化させていくが需要家負荷は変化しないものとする。そのため、得られるシミュレーション結果としては $11^3 = 1331$ 通りの結果が得られる。その結果及び[4.1.2]の結果から抵抗等が一定でない場合についての最適連系点の位置を予測できるようにする。

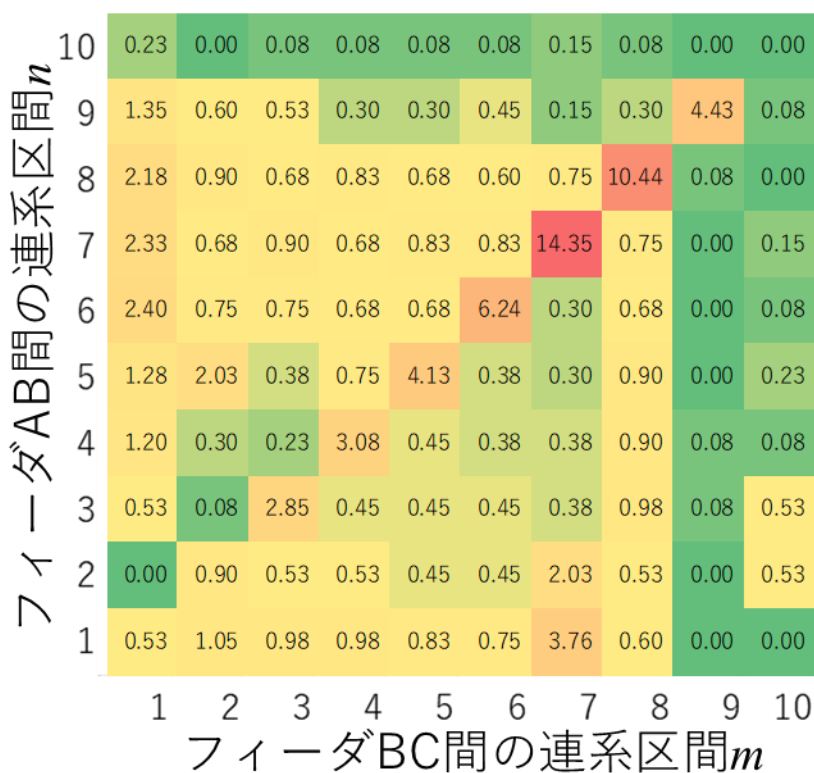
総当たりの結果を Figure 15 に示す。ここでは縦軸をフィーダ AB 間の連系点、横軸をフィーダ B,C 間の連系点として、各マス目には最適連系点の個数のみを示す。加えて各マス目の個数を 11^3 で除算することで最適連系点の割合も示す。

Table 7 想定する配電線の種類

[illegible]



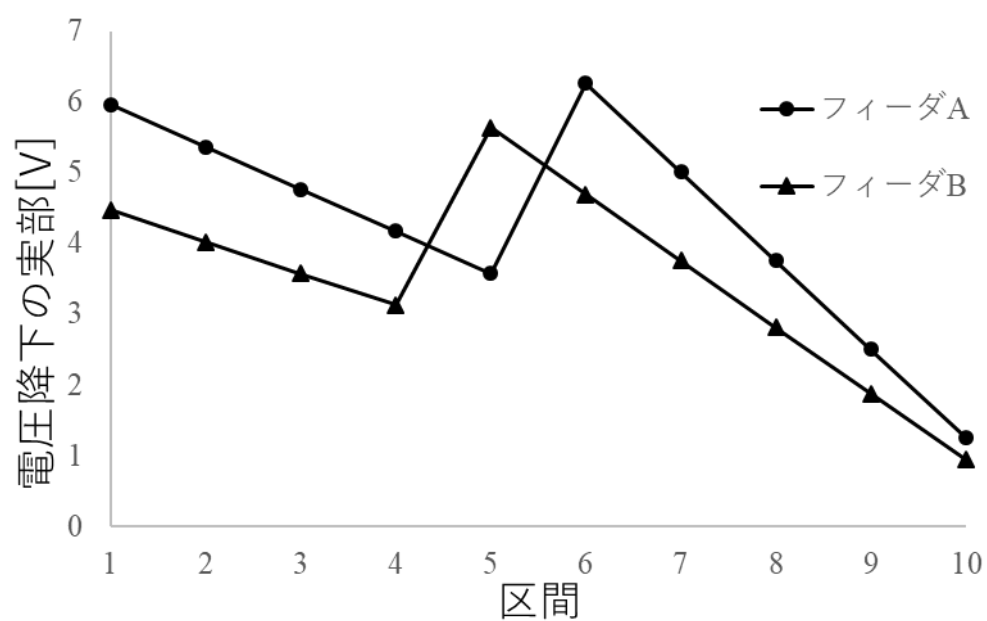
(a) 最適点となる箇所の結果 (個数)



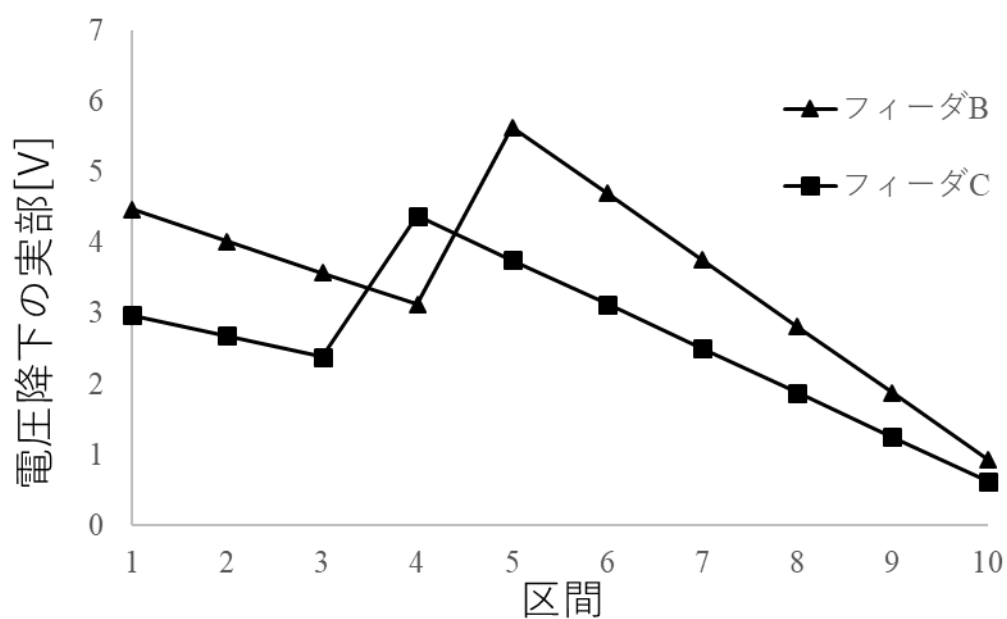
(b) 最適点となる箇所の結果 (割合)

Figure 15 全シミュレーション結果

[illegible]



(a) フィーダ A,B の線路電流×抵抗



(b) フィーダ B,C の線路電流×抵抗

Figure 16 電圧降下の実部

Figure 17 に示すように最適連系点が Figure 16 に示す電圧降下実部の交点とほぼ一致していることがわかる。一致しなかった理由として考えられるのは,[4.1.3]で示したように,線路電流が比例するパラメータであるため,最適連系点が電圧降下実部の交点から 2/3 倍の位置になったのではないかと予想している。

総当たりの結果においても,最適連系点が $n = m$ もしくは n または m のどちらかが電圧降下実部の交点となっていた。1331 通りの内 24 通りの結果において上記の箇所にならない場合があった。しかし,そのすべてについて上記の法則に基づいた連系点の低減率を確認したところ最適連系点ではなかったが,少なくとも最適連系点の低減率の 95% 以上を満たす準最適連系点となっていた。

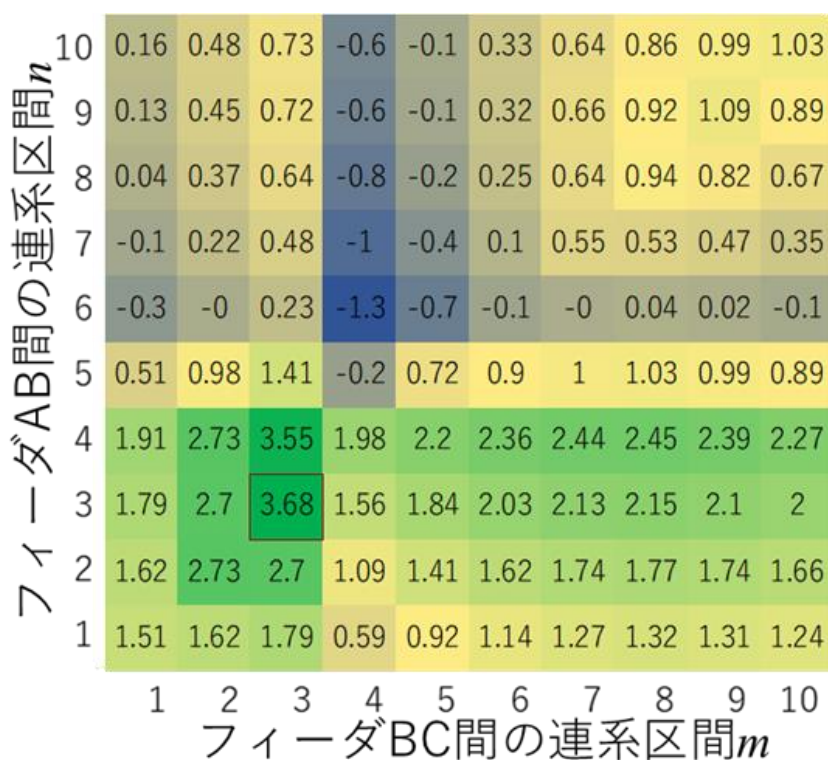


Figure 17 シミュレーション結果

第五章 結言

5.1 研究の成果

研究の成果を以下にまとめる。

- 1, 電流源と電力源の比較から同等の結果が得られることを確認した。
- 2, 許容電流値から,限定的条件でのループ可能な線路条件の導出。
- 3, 抵抗及びインダクタンスが一定の場合について,種々の需要家負荷を想定しそれぞれについて最適連系点を数式的に導出。
- 4, 抵抗及びインダクタンスが一定でない場合について,最適連系点の予測方法の提案。

各章の結論をまとめると,3 フィーダの需要家負荷電流の合計値が 757[A]以下である物理的に近い距離にあるフィーダを選びそのフィーダに流れる線路電流の関係性により最適連系点を決定する。

しかしループ電流の制約からフィーダの線路インピーダンスが大きく異なるようなフィーダでの連系は望ましくない。また 3 フィーダを選ぶ際に需要家負荷の大小関係と線路インピーダンスの大小関係が異なる場合大きな損失低減率を得ることはできないと予想されるため,大小関係が一致している場合にループ運用することが望ましいと考えられる。

5.2 今後の課題

現在本研究では特定の配電系統モデルでのみ検討を行っており、今後はモデルの条件を変更した場合でも最適な連系パターンの導出が可能となるかを検討する必要があると考える。例えば、現在用いている配電系統モデルは同バンク 3 フィーダモデルであり、異なるフィーダ間で 1 本ずつ計 2 本の連系を行って多重ループを構成することを想定しているが、異なる配電用変電所から電力を供給されているフィーダを含める異バンクモデルの場合やフィーダ本数が 4 本以上の場合、多重ループを構成する連系点が 3 点以上の場合などについても計算によって得られた式の検証を行うことで、本研究で提案する最適な連系パターンの導出手法の汎用性の向上を図ることが可能となる。このように現在までで限定してきたモデルの条件を順次取り除いていき、本研究で提案する導出手法の汎用性の更なる向上が今後の課題である。

またモデルの条件を取り除くだけでなく、新たにモデルの要素や評価値を追加することも必要であると考え。序論でも述べたように将来的な配電系統モデルでの課題点の一つである分散型電源を配電系統モデルのいずれかの位置に連系した場合を想定し、線路損失の低減効果だけでなく適正電圧維持も評価値として考慮したうえで最適な連系パターンの導出を可能とする導出手法の検討も今後の課題である。

参考文献

- [1] 林泰弘, 松木純也, 石川伸二, 高野浩貴, 武藤英司, 小林直樹” 数理的最適性が保証された 3 分割 3 連系配電損失最小構成の決定手法” IEEJ Trans PE Vol.126 No.5 2006
- [2] R. Srinivasa Rao, K. Ravindra, K. Satish, and S. V. L. Narasimham ”Power Loss Minimization in Distribution System Using Network Reconfiguration in the Presence of Distributed Generation”IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 28, NO. 1, FEBRUARY 2013
- [3] ATTEYA, Inji Ibrahim, et al. “Radial distribution network reconfiguration for power losses reduction using a modified particle swarm optimisation”. CIRED-Open Access Proceedings Journal, 2017, 2017.1: 2505-2508.
- [4] Ayodeji Olalekan Salau, Yalew Werkie Gebru , Dessalegn Bitew “Optimal network reconfiguration for power loss minimization and voltage profile enhancement in distribution systems” Heliyon 6 (2020) e04233
- [5] 土田貢, 青木秀憲 “多様性に注目した配電系統拡張のための多目的最適化” 電気学会論文誌 B(電力・エネルギー部門誌), IEEJ Trans. PE Vol. 137, No.5 pp381-391 2017
- [6] 花井悠二, 林泰弘, 松木純也 ” 再生可能エネルギー電源が連系された配電システムのループ化と集中型電圧制御の適用効果の実験的検証” IEEL Trans PE Vol130, No11, 2010
- [7] 杉本光生, 竹下隆晴, “UPFC の直並列形変換器によるループ配電系統の全ノード電圧制御”, 電学論 D, Vol.135, No.1, pp1-9(2014)
- [8] 山田和平, 竹下隆晴, 國井康幸, 上田玄, “UPFC を用いた循環電流補償と無効電流抑制によるループ配電系統の線路損失最小化制御”, 電気学会論文誌D (産業応用部門誌) , 133 巻, 1 号, p. 29-36, 2013
- [9] M.-C. Alvarez-Herault, N. N'Doye, C. Gandioli N. Hadjsaida, P. Tixador “Meshed distribution network vs reinforcement to increase the distributed generation connection” Sustainable Energy, Grids and Networks 1 (2015) 20–27
- [10] Liang Che,, Xiaping Zhang, Mohammad Shahidehpour, Ahmed Alabdulwahab, Yusuf Al-Turki “Optimal Planning of Loop-Based Microgrid Topology” IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, VOL. 8, NO. 4, JULY 2017

-
- [11] Mahmoud A. Sayed, Takaharu Takeshita " Line Loss Minimization in Isolated Substations and Multiple Loop Distribution Systems Using the UPFC " IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 29, NO. 11, NOVEMBER 2014
- [12] V.V.S.N Murty, Ashwani Kumar"Mesh distribution system analysis in presence of distributed generation with time varying load model"Electrical Power and Energy Systems 62 (2014) 836–854
- [13] Atma Ram Gupta *, Ashwani Kumar 1"Optimal placement of D-STATCOM using sensitivity approaches in mesh distribution system with time variant load models under load growth"Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology, Kurukshetra, Haryana 136119, IndiaAin Shams Engineering Journal (2016) 9, 783–799

付録

(1) (2)式導出

まず連系点が一つの場合のループ電流を求める。

Figure A-1 に示すように開放電圧及び合成インピーダンスを求めることで以下のようにループ電流が求まる。

$$I_{ab} = \frac{V_a - V_b}{\sum_{k=1}^n Z_{Ak} + \sum_{k=1}^n Z_{Bk}} \quad (\text{A} - 1)$$

また

$$V_a = E - \sum_{k=1}^n Z_{Ak} I_{Ak}$$

$$V_b = E - \sum_{k=1}^n Z_{Bk} I_{Bk}$$

$$V_a - V_b = \sum_{k=1}^n Z_{Bk} I_{Bk} - \sum_{k=1}^n Z_{Ak} I_{Ak}$$

であるから

$$I_{ab} = \frac{\sum_{k=1}^n Z_{Bk} I_{Bk} - \sum_{k=1}^n Z_{Ak} I_{Ak}}{\sum_{k=1}^n Z_{Ak} + \sum_{k=1}^n Z_{Bk}} \quad (\text{A} - 2)$$

となる。

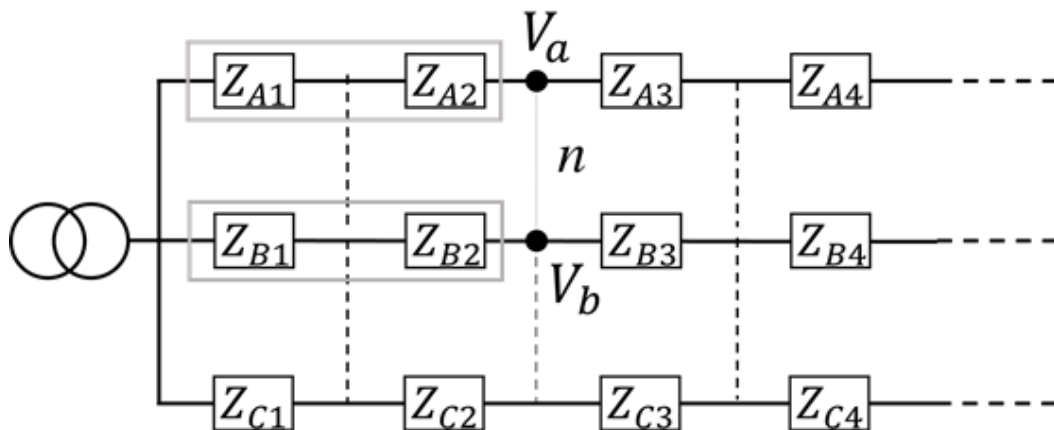


Figure A - 1 ループ電流の求め方(連系点が1つ)

この状態をもとに連系点が二つの場合のループ電流を求める。Figure A-2 に示すように開放電圧及び合成インピーダンスを求め、その値からループ電流を求めると以下のようになる。

$$I_{bc} = \frac{V'_b - V_c}{Z_c + Z_{ab}} \quad (A-3)$$

また

$$Z_{ab} = \sum_{k=n}^m Z_{Bk} + \frac{(\sum_{k=1}^n Z_{Bk})(\sum_{k=1}^n Z_{Ak})}{\sum_{k=1}^n Z_{Bk} + \sum_{k=1}^n Z_{Ak}}$$

$$Z_c = \sum_{k=1}^m Z_{Ck}$$

$$V'_b = E - \left(\sum_{k=1}^n Z_{Bk} I_{ab} \right) - \left(\sum_{k=1}^m Z_{Bk} I_{Bk} \right)$$

$$V_c = E - \sum_{k=1}^n (Z_{Ck} I_{Ck})$$

であるから、 I_{bc} は本文(1)式のように表すことができる。

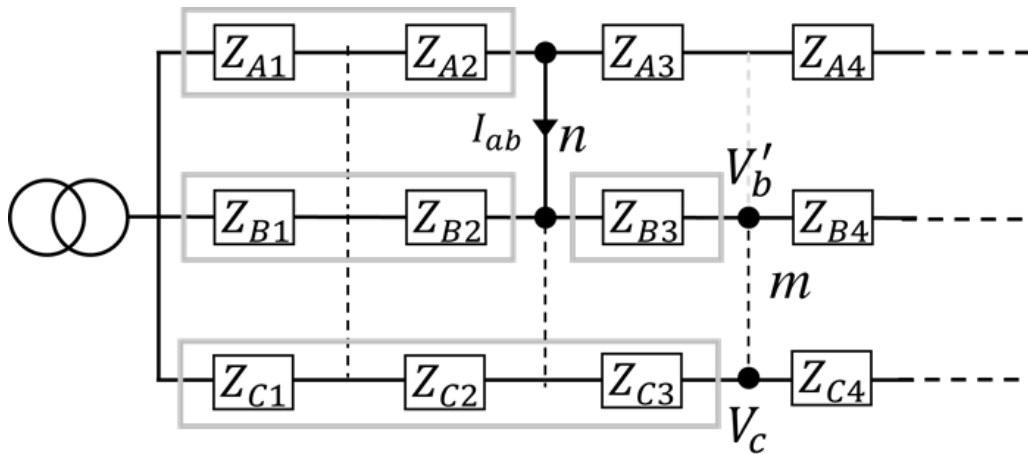


Figure A - 2 ループ電流の求め方(連系点が2つ)

次に,ループ電流が流れたことにより、もともと流れていたループ電流に分流する分だけの変化が生じる。変化後の電流を I'_{ab} とすると以下のように表すことができる。

$$I'_{ab} = I_{ab} + \frac{(\sum_{k=1}^n Z_{Bk})(\sum_{k=1}^n Z_{Ak})}{\sum_{k=1}^n Z_{Bk} + \sum_{k=1}^n Z_{Ak}} I_{bc} \quad (\text{A} - 4)$$

この(A-4)式に(A-1)式を代入することで本文(2)式が得られる。

また, $R_{Ak} = R_{Bk} = R_{Ck} = R$ であるときは I_{bc} , I'_{ab} は次のように表される。

$$I_{bc} = \frac{2}{4m - n} \left(\left(\sum_{k=1}^m I_{Ck} \right) - \left(\sum_{k=1}^m I_{Bk} \right) + n I_{ab} \right)$$

$$I'_{ab} = I_{ab} + \frac{1}{2} I_{bc}$$

$$I_{ab} = \frac{1}{2n} \left(\sum_{k=1}^n I_{Bk} - \sum_{k=1}^n I_{Ak} \right)$$

(3)式導出

放射状時の線路損失は次のようになる

$$P_r = \sum_{k=1}^{10} R_{Ak} I_{Ak}^2 + \sum_{k=1}^{10} R_{Bk} I_{Bk}^2 + \sum_{k=1}^{10} R_{Ck} I_{Ck}^2 \quad (A-5)$$

また、フィータ AB 間及びフィータ BC 間で連系している時の線路損失は次のようになる。

$$\begin{aligned} P_{l2} = & \sum_{k=1}^n R_{Ak} (I_{Ak} + I'_{ab})^2 + \sum_{k=n}^{10} R_{Ak} I_{Ak}^2 + \sum_{k=1}^n R_{Bk} (I_{Bk} - I'_{ab} + I_{bc})^2 \\ & + \sum_{k=n}^m R_{Bk} (I_{Bk} + I_{bc})^2 \\ & + \sum_{k=m}^{10} R_{Bk} I_{Bk}^2 + \sum_{k=1}^m R_{Ck} (I_{Ck} - I_{bc})^2 + \sum_{k=m}^{10} R_{Ck} I_{Ck}^2 \end{aligned} \quad (A-6)$$

ここで、低減率 $P_2 = P_r - P_{l2}$ を計算すると以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} P_2 = & \sum_{k=1}^n -R_{Ak} (2I_{Ak} I'_{ab} + I'_{ab}^2) + \sum_{k=1}^n R_{Bk} (2I_{Bk} I'_{ab} + 2I_{bc} I'_{ab} - 2I_{Bk} I_{bc} - I'_{ab}^2 - I_{bc}^2) \\ & - \sum_{k=n}^m R_{Bk} (2I_{bc} I_{Bk} + I_{bc}^2) - \sum_{k=1}^m R_{Ck} (-2I_{Ck} I_{bc} + I_{bc}^2) \end{aligned} \quad (A-7)$$

これを $R_{Ak} = R_{Bk} = R_{Ck} = R$ として式変形すると以下ようになる。

$$\begin{aligned}
P_2 &= -R \left(2I'_{ab} \sum_{k=1}^n (I_{Ak}) - 2I'_{ab} \sum_{k=1}^n (I_{Bk}) + 2I_{bc} \sum_{k=1}^n I_{Bk} + 2I_{bc} \sum_{k=n}^m I_{Bk} + -2I_{bc} \sum_{k=1}^m I_{Ck} \right. \\
&\quad \left. + 2nI'_{ab}{}^2 - 2nI_{bc}I'_{ab} + 2mI_{bc}{}^2 \right) \\
&= -R \left(2I'_{ab} \left(\sum_{k=1}^n (I_{Ak}) - \sum_{k=1}^n (I_{Bk}) \right) + 2I_{bc} \sum_{k=1}^n I_{Bk} + 2I_{bc} \sum_{k=1}^m I_{Bk} - 2I_{bc} \sum_{k=1}^n I_{Bk} \right. \\
&\quad \left. - 2I_{bc} \sum_{k=1}^m I_{Ck} + 2nI'_{ab}{}^2 - 2nI_{bc}I'_{ab} + 2mI_{bc}{}^2 \right) \\
&= -2R \left(I'_{ab} \left(\sum_{k=1}^n I_{Ak} - \sum_{k=1}^n I_{Bk} \right) + I_{bc} \sum_{k=1}^m I_{Bk} - I_{bc} \sum_{k=1}^m I_{Ck} + nI'_{ab}{}^2 - nI_{bc}I'_{ab} + mI_{bc}{}^2 \right)
\end{aligned}$$

(A-8)

ここでシグマのついている項とついていない項に分けて考える。シグマの付いた項は以下ようになる。

$$\begin{aligned}
& I'_{ab} \left(\sum_{k=1}^n I_{Ak} - \sum_{k=1}^n I_{Bk} \right) + I_{bc} \left(\sum_{k=1}^m I_{Bk} - \sum_{k=1}^m I_{Ck} \right) \\
&= \left(I_{ab} + \frac{1}{2} I_{bc} \right) \left(\sum_{k=1}^n I_{Ak} - \sum_{k=1}^n I_{Bk} \right) \\
&\quad + \frac{2}{4m-n} \left(\sum_{k=1}^m I_{Ck} - \sum_{k=1}^m I_{Bk} + n I_{ab} \right) \left(\sum_{k=1}^m I_{Bk} - \sum_{k=1}^m I_{Ck} \right) \\
&= \left(\frac{1}{2n} \left(\sum_{k=1}^n I_{Bk} - \sum_{k=1}^n I_{Ak} \right) + \frac{1}{4m-n} \left(\left(\sum_{k=1}^m I_{Ck} \right) - \left(\sum_{k=1}^m I_{Bk} \right) + \frac{1}{2} \left(\sum_{k=1}^n I_{Bk} - \sum_{k=1}^n I_{Ak} \right) \right) \right) \\
&\quad \times \left(\sum_{k=1}^n I_{Ak} - \sum_{k=1}^n I_{Bk} \right) + \left(\frac{2}{4m-n} \left(\left(\sum_{k=1}^m I_{Ck} \right) - \left(\sum_{k=1}^m I_{Bk} \right) + \frac{1}{2} \left(\sum_{k=1}^n I_{Bk} - \sum_{k=1}^n I_{Ak} \right) \right) \right) \\
&\quad \times \left(\sum_{k=1}^m I_{Bk} - \sum_{k=1}^m I_{Ck} \right) \\
&= \left(\frac{1}{2n} \left(\frac{4m}{4m-n} \right) \left(\sum_{k=1}^n I_{Bk} - \sum_{k=1}^n I_{Ak} \right) + \frac{1}{4m-n} \left(\sum_{k=1}^m I_{Ck} - \sum_{k=1}^m I_{Bk} \right) \right) \left(\sum_{k=1}^n I_{Ak} - \sum_{k=1}^n I_{Bk} \right) \\
&\quad + \left(\frac{2}{4m-n} \left(\left(\sum_{k=1}^m I_{Ck} \right) - \left(\sum_{k=1}^m I_{Bk} \right) + \frac{1}{2} \left(\sum_{k=1}^n I_{Bk} - \sum_{k=1}^n I_{Ak} \right) \right) \right) \left(\sum_{k=1}^m I_{Bk} - \sum_{k=1}^m I_{Ck} \right)
\end{aligned}$$

また,シグマのついていない項については以下のようになる。

$$\begin{aligned}
nI'_{ab}{}^2 - nI_{bc}I'_{ab} + mI_{bc}{}^2 &= nI'_{ab}(I'_{ab} - I_{bc}) + mI_{bc}{}^2 \\
I'_{ab} &= I_{ab} + \frac{1}{2}I_{bc} \text{より} \\
nI'_{ab}{}^2 - nI_{bc}I'_{ab} + mI_{bc}{}^2 &= n\left(I_{ab}{}^2 - \frac{1}{4}I_{bc}{}^2\right) + m(I_{bc})^2 \\
&= nI_{ab}{}^2 + \left(\frac{4m-n}{4}\right)I_{bc}{}^2 \\
&= n\left(\frac{1}{2n}\left(\sum_1^n I_{Bk} - \sum_1^n I_{Ak}\right)\right)^2 \\
&\quad + \left(\frac{4m-n}{4}\right)\left(\frac{2}{4m-n}\left(\sum_{k=1}^m I_{Ck} - \sum_{k=1}^m I_{Bk} + \frac{1}{2}\left(\sum_1^n I_{Bk} - \sum_1^n I_{Ak}\right)\right)\right)^2 \quad (A-10)
\end{aligned}$$

この(A-9), (A-10)式を足し合わせると次のようになる。

$$\begin{aligned}
P_2 &= -2R\left(\left(\sum_1^n I_{Bk} - \sum_1^n I_{Ak}\right)^2 \left(\frac{1}{2n}\left(\frac{-4m}{4m-n}\right) + \frac{1}{4n} + \frac{1}{4(4m-n)}\right)\right) + \left(\sum_{k=1}^m I_{Ck} - \sum_{k=1}^m I_{Bk}\right)^2 \\
&\quad \times \left(\frac{1}{4m-n} + \frac{-2}{4m-n}\right) + \left(\sum_{k=1}^m I_{Ck} - \sum_{k=1}^m I_{Bk}\right)\left(\sum_1^n I_{Bk} - \sum_1^n I_{Ak}\right)\left(\frac{-1}{4m-n} + \frac{-1}{4m-n}\right. \\
&\quad \left. + \frac{1}{4m-n}\right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 2R \left(\left(\sum_1^n I_{Bk} - \sum_1^n I_{Ak} \right)^2 \left(\frac{1}{n} \left(\frac{m}{4m-n} \right) \right) + \left(\sum_{k=1}^m I_{Ck} - \sum_{k=1}^m I_{Bk} \right)^2 \left(\frac{1}{4m-n} \right) + \left(\sum_{k=1}^m I_{Ck} \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - \sum_{k=1}^m I_{Bk} \right) \left(\sum_1^n I_{Bk} - \sum_1^n I_{Ak} \right) \left(\frac{1}{4m-n} \right) \right) \tag{A-11}
 \end{aligned}$$

よって本文(3)式が求まった。

(11)式導出

区間 4 に流れている電流を分布定数で示すと、変電所側から 40%の位置に流れている電流と考えることができる。よってこの電流は次のように表すことができる。

$$\begin{pmatrix} I_A(0,4l) \\ I_B(0,4l) \\ I_C(0,4l) \end{pmatrix} = 0.6 \begin{pmatrix} Al \\ Bl \\ Cl \end{pmatrix} \quad (\text{A} - 12)$$

ここでループ電流は以下のように表されている

$$I_{bc} = \frac{1}{4m - n} \left\{ (2ml - m^2)(C - B) + n(B - A) \left(l - \frac{1}{2}n \right) \right\}$$

$$I'_{ab} = \frac{1}{4m - n} \left\{ \frac{1}{2} (2lm - m^2)(C - B) + m(B - A)(2l - n) \right\}$$

ここで、連系点を変電所側から 10%の位置に固定した場合のループ電流を求めると以下のようになる。

$$I_{bc} = \frac{l}{3} \left\{ \left(\frac{19}{10} \right) (C - B) + (B - A) \left(\frac{19}{20} \right) \right\} \quad (\text{A} - 13)$$

$$I'_{ab} = \frac{l}{3} \left\{ \left(\frac{19}{10} \right) (B - A) + (C - B) \left(\frac{19}{20} \right) \right\} \quad (\text{A} - 14)$$

$$\begin{pmatrix} |I'_{ab} + I_A(0.4l)| \\ |I_{bc} - I'_{ab} + I_B(0.4l)| \\ |I_{bc} + I_C(0.4l)| \end{pmatrix} \leq 240 \quad (\text{A} - 15)$$

(A - 12)(A - 13)(A - 14)を(A - 15)式に代入することで本文(11)式が求まる。

(13),(14),式導出

(A-7)式が必ず負になる条件を考える。

右辺第一項、第三項は負であるため右辺第二項、第四項について考える。

第二項ではシグマの中身について以下の式が成り立つときに負となる。

$$2I_{Bk}I'_{ab} + 2I_{bc}I'_{ab} - 2I_{Bk}I_{bc} - I_{ab}^2 - I_{bc}^2 \leq 0$$

また $2I_{bc}I'_{ab} - I_{ab}^2 - I_{bc}^2$ は負であるため上式を式変形すると以下のようなになる。

$$2I_{Bk}I'_{ab} - 2I_{Bk}I_{bc} \leq 0$$

よって

$$I_{bc} \geq I'_{ab}$$

となり,本文(13)式が求まった。

続いて右辺第四項については第一項と比較し、以下の式が成り立つときに負となる。

$$\sum_1^n R_{Ak}(2I_{Ak}I'_{ab} + I_{ab}^2) \leq \sum_1^m R_{Ck}(2I_{Ck}I_{bc} - I_{bc}^2) \quad (\text{A-16})$$

ここで

$$\begin{aligned} \sum_1^m R_{Ck}(2I_{Ck}I_{bc}) &\geq \sum_1^m R_{Ck}(2I_{Ck}I_{bc} - I_{bc}^2) \\ \sum_1^n R_{Ak}(2I_{Ak}I'_{ab}) &\leq \sum_1^n R_{Ak}(2I_{Ak}I'_{ab} + I_{ab}^2) \end{aligned}$$

であるから(A-16)式は以下の式を満たすときにも成り立つ。

$$\sum_1^n R_{Ak} (2I_{Ak} I'_{ab}) \cong \sum_1^m R_{Ck} (2I_{Ck} I_{bc})$$

上式を変形すると

$$\frac{I'_{ab}}{I_{bc}} \sum_1^m R_{Ak} I_{Ak} \cong \sum_1^m R_{Ck} I_{Ck}$$

となる。よって本文(14)式が求まった。

従来結果及びシミュレーション結果と計算による結果の比較

従来シミュレーション結果を得る際にはXTAP (eXpandable Transient Analysis Program) を用いていた。しかし本研究ではシミュレーション時間短縮のために PSIM を用いている。その結果の差異について比較結果 Figure A-3 に示す。また,PSIM によって得られた結果と計算式によって得られる結果を比較する。比較結果を Figure A-4 に示す。比較用パラメータについては Table A-1 示す。

比較対象としては Figure A-3, A-4 どちらについても損失削減率[%]を比較対象としており,その損失削減率[%]の差をとり,100 倍した値を PSIM によって得られた値で除算した値を示している。Figure A-3, A-4 どちらについても縦軸をフィーダ AB 間の連系点, 横軸をフィーダ BC 間の連系点としている。

Figure A-3, A-4 の結果は損失削減率[%]の誤差率[%]を導出しており, この結果からどのような

Table A-1 比較用パラメータ

			1区	2区	3区	4区	5区	6区	7区	8区	9区	10区	合計
フィーダA	線路 インピーダンス	R[mΩ]	9	19.7	25.1	30.4	35.4	41.3	46.8	49.9	55.3	87.8	400.7
		L[mΩ]	22	47	55.7	60	63	65.2	67.6	67.5	69.2	77	594.2
	負荷電流[A]		3	12	23	30	27	30	28	30	22	17	222
フィーダB	線路 インピーダンス	R[mΩ]	19.3	35.1	40.1	44.1	52.3	60.3	70	76.2	91.4	162.9	651.7
		L[mΩ]	47.7	86.1	93.3	93.5	96.4	98.4	102.2	102.3	105.6	119.3	944.8
	負荷電流[A]		6	19	27	35	32	35	35	35	32	22	278
フィーダC	線路 インピーダンス	R[mΩ]	79	109.8	126.6	146.1	170.6	196.7	218.5	256.5	330.5	449.3	2084
		L[mΩ]	176.6	220.7	223.9	228.8	232.2	235.2	237.2	240.4	245.7	264.7	2305
	負荷電流[A]		16	24	24	26	24	22	22	21	20	13	212

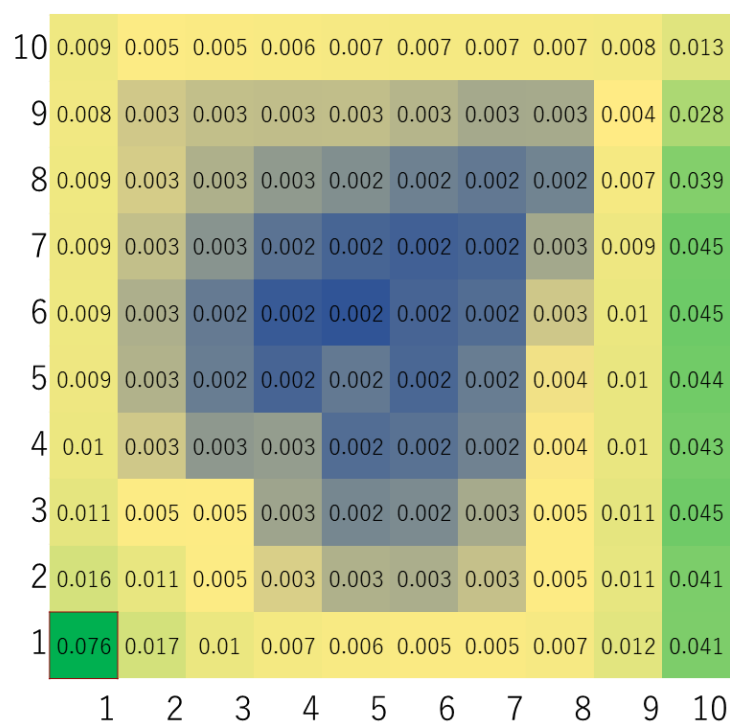


Figure A-3 XTAP と PSIM の結果の比較

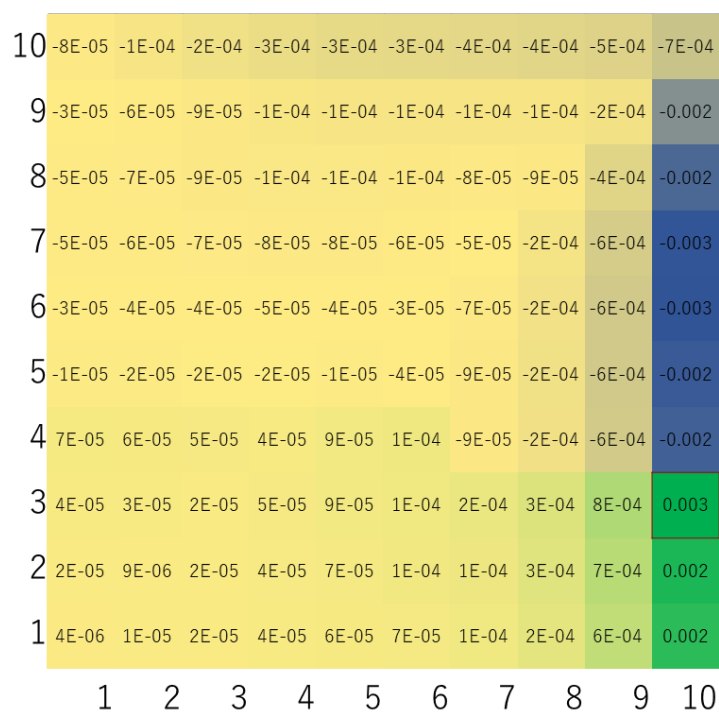


Figure A-3 計算によって得られる結果と PSIM の結果の比較

関連論文および口頭発表

・国内会議発表論文

- [1] 石川駿貴, 奥田駿斗, 山村直紀, 石田宗秋: 「分布定数回路とみなした多重ループ配電 系統での最適ループ点の導出」, 令和 2 年電気学会全国大会, 6-150 , (2020.3.12)
- [2] 石川駿貴, 山村直紀「多重ループ配電系統での最適ループ点の導出」令和 2 年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, B4-5 (2021 9/7-8, WEB)

・国際会議発表論文

- [1] Shunki Ishikawa , Naoki Yamamura , Yasuyuki Kunii, Fukashi Ueda, and Muneaki Ishida, “Construction of search method for optimal interconnection pattern in distribution system operated by multiple loops”, 2020 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (2020) at Hamamatsu (2020.11.19-20)
- [2] Shunki Ishikawa, Naoki Yamamura, Fukashi Ueda, Yasuyuki Kunii
“ Derivation of optimal interconnection pattern in a distribution system operated in multiple loops “2021 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (2021 10/31-11/3, WEB)

謝辞

本研究の遂行および本論文の作成において、丁寧にご指導いただきました三重大学工学部電気電子工学科 准教授 山村直紀先生，中部大学 工学部宇宙航空理工学科 教授 工学博士 石田宗秋先生，三重大学 工学部電気電子工学科 助教 小山昌人先生，工学部電気電子工学科 特別指導員 平井淳之先生，三重大学 工学部電気電子工学科 教授 駒田諭先生，三重大学 工学部電気電子工学科 教授 弓場井一裕先生，三重大学 工学部電気電子工学科 助教 矢代大祐先生，三重大学 工学部電気系技術室技官 中村勝氏に心より御礼申し上げます。

また，2019 年 4 月の研究室配属から多くの時間を共に過ごした制御システム研究室，エネルギーシステム研究室，電機システム研究室の皆様には大変お世話になりました。感謝いたします。

最後に，何不自由なく大学生活を送らせて頂いた両親，親戚一同に心から感謝し，厚く御礼申し上げます。