

電力潮流の最適化 (第5報)*

山城 迪**

中村 陽一**

(昭和52年9月30日受理)

Optimization of Power Flow (Part 5)

by Susumu YAMASHIRO and Yoich NAKAMURA

The authors have been discussing about the optimization of power flow using DC power flow calculation method. The advantage of using DC method is in its fast calculation and furthermore this method can give us nearly equal results compared with those using more rigorous methods such as Newton-Raphson.

One of the recent subjects of study pertaining to the power system optimization was to develop a fast solution technique corresponding to the on-line control of power systems.

One problem is that DC optimization method can be applied only for real power flow. Another important control problem of power systems is voltage-reactive power control. This paper intends to discuss about the general power flow optimization considering reactive power from the standpoint of calculation speed.

Firstly, making use of the stiffness between real power and voltage-angle and between reactive power and voltage-magnitude, we can treat $P-\delta$ phase and $Q-V$ phase separately. For $P-\delta$ phase, we used DC method and for $Q-V$ phase, we use Lagrange multiplier and the gradient method.

Secondly, we must give consideration for an iterative optimization technique which can get an optimal solution by alternately iterating these two independent phases and give some calculated results for the simple model system.

1. ま え が き

筆者等は文献(1)~(4)において、直流法(DC法)潮流計算手法を用いた電力潮流の最適化について論じてきた。DC法を用いることの利点は計算の高速性にあるが、さらに、厳密解法であるNewton-Raphson法を用いた最適解とほぼ一致した結果が得られるという点に、DC法の現実的な有用性があると言える。過去十数年間研究が続けられてきた電力潮流最適化問題における今日的課題の一つは、on-lineでの電力系統制御に対応して、出来る限り高速性の得られる解析手法を開発することにある。

* 電気四学会北海道支部大会で発表(1977-10)

** 北見工業大学電気工学科

さて、筆者等の開発した DC 法による最適化手法は^{1)~4)}、有効電力にのみ注目した方法であった。有効電力制御と並んで重要な系統制御問題は、電圧—無効電力制御であり、これを含めた、一般的な電力潮流の最適化問題を、高速性を主題にした考察を行うことが本論文の目的である。すなわち、有効電力と電圧位相角 ($P-\delta$)、および、無効電力と電圧の大きさ ($Q-V$) の強い結びつきを利用することによって、 $P-\delta$ 、および、 $Q-V$ の二つの phase を各々独立に扱い、 $P-\delta$ の決定には筆者の開発した DC 法を用い、Lagrange 乗数および Gradient 法を用いて、 $Q-V$ の最適化を計ることとする。次に、各々独立した二つの最適化過程を交互に繰り返すことによって最終的な解に到達することの出来る最適化方式について、その基礎的な考察を以下に述べ、簡単なモデル系統への適用例についても報告する。

2. 問題の定式化

電力潮流の最適化を考える場合、まず、最適化の目標を明確にし、次に、適当な目的関数を定義する必要がある。一般には、系統内の有効電力損失、あるいは、火力発電機の燃料費などが最適化の目標に選ばれるが、ここでは文献(1)~(4)に従って、燃料費の最小化をすることとする。このとき、問題は種々の制約を満足しながら、コストを最小にするような制御変数および状態変数の値を求めることになるが、制御変数は発電機出力および電圧制御母線における母線電圧の大きさであり、状態変数としては、電圧位相角および負荷母線における母線電圧の大きさが考えられる。一方、制約条件としては、発電機出力の上下限、母線電圧の大きさの上下限、送電線路に流れる潮流の上限、さらには、各母線における電力平衡を規定する潮流方程式などが挙げられる。

従って、電力潮流の最適化を議論する場合には上述の諸制約を考慮しなければならないが、本論文では、DC 法の一般的潮流最適化問題への適用の妥当性の検討を主体にし、母線電圧の大きさ、および線路潮流に関する制約を考えない場合についての考察を行う。

さて、DC 法によって $P-\delta$ の最適化を行うことにすれば、 $Q-V$ の最適化では P に関する潮流方程式は必要ない。また、 $P-\delta$ の最適化では、 Q に関する潮流方程式は必要ないが、 P の需給平衡条件は満足されなければならない(以下、有効電力および無効電力を簡単に P, Q とし、また、特にことわらない限り電力は有効電力を意味するものとする)。

$P-\delta, Q-V$ の二つの phase によって最適化を行う場合の制約条件は

(イ) $P-\delta$ の最適化においては、電力の需給平衡条件

$$PL - \sum_j P_j = 0 \quad PL: \text{送電損失}, \quad P_j: \text{ノード } j \text{ の電力} \quad (1)$$

(ロ) $Q-V$ の最適化においては、負荷ノードの Q バランス

$$Q_l - q_l = 0 \quad Q_l, q_l: \text{ノード } l \text{ の無効電力および無効電力指定値} \quad (2)$$

いま、 F_m を m 号発電機の燃料費とすると、ラグランジュ乗数 λ および γ_l を用いて、(1),

(2) の制約を組み込んだ目的関数を次に定義することができる。なお、発電機出力の上下限は、 $P-\delta$ の最適化における、等 λ 配分の過程で考慮されることに注意されたい。

$$\Phi = \sum_m F_m(G_m) + \lambda \left(PL - \sum_{j=1}^N P_j \right) + \sum_l \tilde{r}_l (Q_l - q_l) \quad (3)$$

ここで、 G は発電機出力、添字 m は、 $m \in M$, $l \in L$ で、 M は発電機ノードの、 L は負荷ノードの集合を示す。また、 N は全ノード数。

いま、ノード m の負荷電力を D_m とすると、 $P_m = G_m - D_m$ であるから、(3) 式を最小にするための必要条件は、 $PL = PL(P, Q)$ の関係を考慮して、(4)~(7) 式となる。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial P_m} = \sum_m \frac{\partial F_m(G_m)}{\partial G_m} + \lambda \left(\frac{\partial PL}{\partial P_m} - 1 \right) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \lambda} = PL - \sum_{j=1}^N P_j = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial Q_m} = \lambda \frac{\partial PL}{\partial Q_m} + \sum_l \tilde{r}_l \frac{\partial Q_l}{\partial Q_m} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \tilde{r}_l} = Q_l - q_l = 0 \quad (7)$$

(4) 式は周知の協調方程式であり、(5), (7) 式は等式制約条件そのものである。

系統のブス・アドミッタンス行列を $Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$ 、ノード電圧を $\dot{V}_i = V_i \varepsilon^{j\theta_i}$ とすると (文献(1)~(4)は $\dot{E}_i = E_i \varepsilon^{j\theta_i}$ の記号を用いてきたが、ここでは、 $Q-V$ 制御に対応させてこの表示を用いる)。

$$\dot{S}_i = P_i + jQ_i = \dot{V}_i \dot{I}_i = \dot{V}_i \sum_j \dot{Y}_{ij} \dot{V}_j \quad (8)$$

$$P_i = \sum_j V_i V_j \left\{ G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) \right\} = P_i(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}) \quad (9)$$

$$Q_i = \sum_j V_i V_j \left\{ G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) \right\} = Q_i(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}) \quad (10)$$

このように、 P, Q ともにノード電圧の大きさおよび位相角の関数となるが、 P と δ, Q と V の強い結びつきを考慮して

$$P_i(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}) \Rightarrow P_i(\boldsymbol{\delta})_{\mathbf{V}=\text{const}} \quad (11)$$

$$Q_i(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}) \Rightarrow Q_i(\mathbf{V})_{\boldsymbol{\delta}=\text{const}} \quad (12)$$

の如く、 P を δ のみの、また、 Q を V のみの関数として扱うと、 V が既知という条件のもとに (4), (5) 式から、最適発電機出力および電圧位相角を、また、 δ が既知という条件のもとに、(6), (7) 式から電圧制御母線の無効電力および各ノード電圧の大きさを決定することができる。

3. 有効電力および電圧位相角の最適化 ($P-\delta$ の最適化)

V 一定の条件下での有効電力の最適化については、すでに文献(1)~(4)で報告してあるの

で、ここでは、電圧 V がフラット (すべてのノード電圧の大きさが等しい) でない場合の DC 法潮流計算および線路電流の求め方についてのみ説明する。

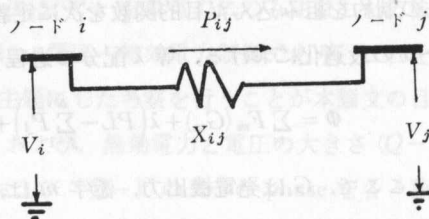


図-1 線路潮流

3-1 V がフラットでない場合の直流法潮流計算

図-1において、有効電力潮流 P_{ij} は

Fig. 1. Power flow of transmission line.

$$P_{ij} = \frac{V_i V_j \sin(\delta_i - \delta_j)}{x_{ij}} \approx \frac{V_i V_j (\delta_i - \delta_j)}{x_{ij}} \tag{13}$$

ここで、 $b'_{ij} = V_i V_j / x_{ij}$ とおくと、ノード電力 P_i は

$$[P_i] = [b'_{ij}] [\delta_j] \tag{14}$$

3-2 線路電流の決定

図-1 から、ノード i から j へ流れる電流は

$$\begin{aligned} \dot{I}_{ij} &= \frac{V_i \varepsilon^{j\theta_i} - V_j \varepsilon^{j\theta_j}}{jx_{ij}} \\ |\dot{I}_{ij}| &= \sqrt{\frac{V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j)}{x_{ij}^2}} \approx \frac{\sqrt{(V_i - V_j)^2 + (\delta_i - \delta_j)^2 V_i V_j}}{x_{ij}} \end{aligned} \tag{15}$$

4. 無効電力および電圧の大きさの最適化 ($Q-V$ の最適化)

δ 一定の条件下での、 Q および V の決定は、(6), (7) 式で行うことができる。いま、 V を制御可能なもの (例えば、発電機母線の V)、すなわち制御変数 V_m と、制御不可能なもの (例えば、負荷母線のような $P-Q$ 指定ノードの V)、すなわち状態変数 V_l とに分けて考える。

$$V = \begin{bmatrix} V_m \\ V_l \end{bmatrix} \tag{16}$$

Q が V のみの関数であることに注意すると

$$\frac{\partial PL}{\partial Q_m} = \left[\frac{\partial PL}{\partial V} \right] \left[\frac{\partial V}{\partial Q_m} \right] = \left[\left[\frac{\partial PL}{\partial V_m} \right] \left[\frac{\partial PL}{\partial V_l} \right] \right] \begin{bmatrix} \left[\frac{\partial V_m}{\partial Q_m} \right] \\ \left[\frac{\partial V_l}{\partial Q_m} \right] \end{bmatrix} \tag{17}$$

であるから、(6) 式は、(18), (19) 式に等しい。

$$\lambda \left[\frac{\partial PL}{\partial V_m} \right] + \sum_l \gamma_l \left[\frac{\partial Q_l}{\partial V_m} \right] = \mathbf{0} \tag{18}$$

$$\lambda \left[\frac{\partial PL}{\partial V_l} \right] + \sum_l \gamma_l \left[\frac{\partial Q_l}{\partial V_l} \right] = \mathbf{0} \tag{19}$$

(18) 式の左辺は制御変数 V_m に関する目的関数のグラジェントベクトルであるから、最適解を、

いわゆる、グラジェント法により求めることができることを示している。

有効電力損失 PL および無効電力 Q_l が電圧 V の2次形式で表わされることに注意すると、ラグランジュ乗数 λ, γ_l および状態変数 V_l が既知の場合

$$f = \lambda(PL - \sum_j P_j) + \sum_l \gamma_l Q_l = \frac{1}{2} \mathbf{V}_m^t \mathbf{A} \mathbf{V}_m + \mathbf{b} \mathbf{V}_m \quad (20)$$

$$\therefore [\nabla f] = \left[\frac{\partial f}{\partial \mathbf{V}_m} \right] = \left[\frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{V}_m} \right] = [\mathbf{A}] [\mathbf{V}_m] + [\mathbf{b}] \quad (21)$$

Φ が \mathbf{V}_m^* で最小値をとるとき

$$[\nabla f] = [\mathbf{A}] [\mathbf{V}_m^*] + [\mathbf{b}] = \mathbf{0} \quad (22)$$

$$\therefore \mathbf{V}_m^* = -[\mathbf{A}]^{-1} [\mathbf{b}] \quad (23)$$

$$= -[\mathbf{A}]^{-1} \left[[\nabla f] - [\mathbf{A}] [\mathbf{V}_m] \right] = \mathbf{V}_m - [\mathbf{A}]^{-1} [\nabla f] \quad (23')$$

(23) または (23)' 式から、 \mathbf{V}_m が無制約であれば、最適制御変数 \mathbf{V}_m^* は適当な出発値 \mathbf{V}_m を仮定して一挙に \mathbf{V}_m^* に到達するグラジェント法 ((23)' 式) によって求まり、これはまた、(18) 式の連立方程式を解くことに等しいことがわかる ((23) 式)。

以上の考察から、無効電力および電圧の最適化を図-2 に示す手順に従って行う。

step 1: (19) 式からラグランジュ乗数 γ_l を求める。すなわち、 $\Phi(\gamma_l, \mathbf{V}_m, \mathbf{V}_l)$ を $\Phi(\gamma_l)$ と考え、 $\mathbf{V}_m^{old}, \mathbf{V}_l^{old}$ には適当な値を仮定する。なお、 λ については、(18), (19) 左辺を λ で割り $\gamma_l/\lambda \Rightarrow \tilde{\gamma}_l$ とおいても、解 \mathbf{V} は変らないから本質的でない。

step 2: $\tilde{\gamma}_l$ および、仮定値 \mathbf{V}_l^{old} を用いて (18) 式から \mathbf{V}_m を求め \mathbf{V}_m^{new} とする。

step 3: $\tilde{\gamma}_l$ および、 \mathbf{V}_m^{new} を用いて (7) 式から状態変数 \mathbf{V}_l を求め \mathbf{V}_l^{new} とする。なお、この step は無効電力に関する潮流方程式を解くことに等しい。

$\mathbf{V}^{new} \Rightarrow \mathbf{V}^{old}$ の置き換えを行い (step 1~step 3) の過程を繰り返す。収束判定は、

$$|\mathbf{V}_m^{old} - \mathbf{V}_m^{new}| < \varepsilon \quad \varepsilon: \text{充分小さい正の数} \quad (24)$$

(24) 式は $\nabla f \Rightarrow \mathbf{0}$ に等しい。

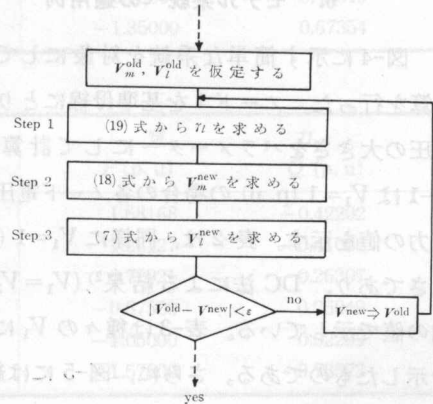


図-2 電圧の大きさの最適化

Fig. 2. Optimization of voltage-magnitude.

5. DC 法を用いた電力潮流最適化のアルゴリズム

(b) 第3章および第4章で述べた $P-\delta$ および $Q-V$ の最適化を組み合わせると、図-3の、無

効電力を考慮した一般的な電力潮流最適化問題に対する DC 法による最適化のアルゴリズムを得る。

phase I: 適当な初期値 V^{old} , δ^{old} を用いて, DC 法により $P-\delta$ の最適化を行う。その終果得られる位相角を δ^{new} とする。 δ^{old} と δ^{new} を比較してその差が十分小さければ最適解が得られた。もし, そうでない場合は phase II へ。

phase II: V^{old} , δ^{new} を初期値として, $Q-V$ の最適化を行う。その結果得られる電圧の大きさを V^{new} とする。 $V^{new} \Rightarrow V^{old}$, $\delta^{new} \Rightarrow \delta^{old}$ の置き換えを行って phase I へ戻る。

6. モデル系統への適用例

図-4 に示す簡単な系統を対象にして種々の計算を行った。ノード1を基準母線にとり, この電圧の大きさをパラメーターにして計算した。

表-1 は $V_1=1$ (p. u) の場合の各ノード電圧および電力の値を示す。表-2 は, 同様に $V_1=1$ (p. u) の場合の発電機出力, 総燃料費, 送電損失の大きさを示す。

表-2 による結果²⁾ ($V_1=V_2=V_3=V_4=V_5=V_6=1$ の場合) を比較のために () 内の値で示している。表-3 は種々の V_1 に対する各ノード電圧の大きさ, 送電損失, 総燃料費を示したものである。さらに, 図-5 には総燃料費と V_1 との関係を図示してある。

表-1 の (a)~(d) を比較すると, 明らかに負荷の増加に伴ってノード電圧の大きさは低下する一方, 位相角の大きさ (基準ノードに対して) が増加していく, 一般的な傾向が見られる。

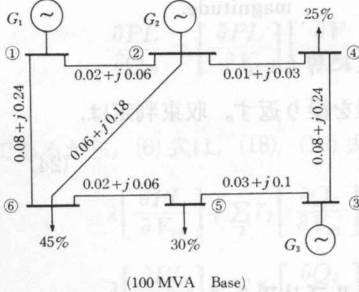


図-4 モデル系統
Fig. 4. Model System.

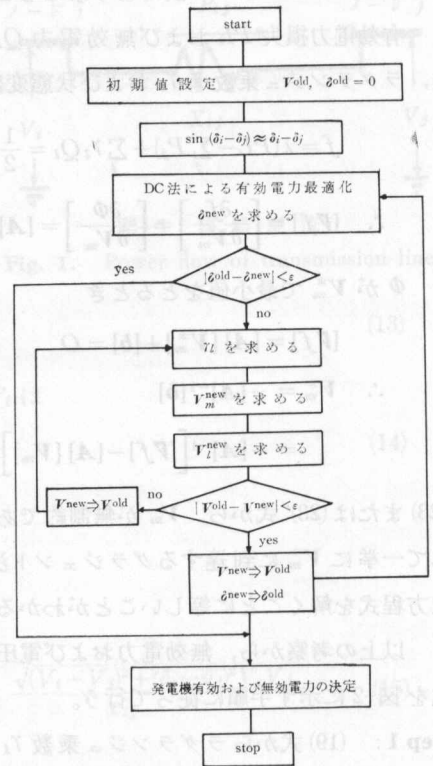


図-3 最適化手順

Fig. 3. Flow chart for optimization.

また, 表-2 から, $V_1=1$ (p. u) としてノード電圧の最適化を行った結果と全ノード電圧を 1 (p. u) とした場合の解 (カッコで表わしたもの) とでは, 発電機出力パターン, 総燃料費, 送電損失とも余り違いはないが, 軽負荷では送電損失および総燃料費共に電圧の最適化を行った方が良い結果を得ていることがわかる。ただし, 重負荷 (400 MW) では損失, コスト共に大きくなっている。これは, 表-1 の (d)

表-1 電圧および電力の最適値 ($V_1=1$ (p. u))

Table 1. Optimal value of voltage and power

(a) 負荷=250 (MW)

ノード番号	電 V (p. u)	圧 δ (rad)	電 P (p. u)	力 Q (p. u)
1	1.00000	0.00000	1.30556	-0.41650
2	1.00105	-0.03794	0.88241	-0.28996
3	1.00970	-0.10949	0.40557	-0.15815
4	1.00147	-0.06285	-0.62500	0.18571
5	1.02080	-0.16791	-0.75000	0.37361
6	1.01830	-0.15853	-1.12500	0.56149

(b) 負荷=300 (MW)

ノード番号	電 V (p. u)	圧 δ (rad)	電 P (p. u)	力 Q (p. u)
1	1.00000	0.00000	1.4932	-0.42891
2	0.99952	-0.04238	1.07061	-0.35028
3	1.00785	-0.11972	0.56549	-0.31048
4	0.99975	-0.07142	-0.75000	0.22293
5	1.02098	-0.19439	-0.90000	0.44819
6	1.01929	-0.18554	-1.35000	0.67354

(c) 負荷=350 (MW)

ノード番号	電 V (p. u)	圧 δ (rad)	電 P (p. u)	力 Q (p. u)
1	1.00000	0.00000	1.68168	-0.42202
2	0.99728	-0.04681	1.26127	-0.41086
3	1.00446	-0.12997	0.72921	-0.26307
4	0.99723	-0.08005	-0.87500	0.26049
5	1.01956	-0.22153	-1.05000	0.52299
6	1.01685	-0.21326	-1.57500	0.78573

(d) 負荷=400 (MW)

ノード番号	電 V (p. u)	圧 δ (rad)	電 P (p. u)	力 Q (p. u)
1	1.00000	0.00000	1.95047	-0.37501
2	0.99280	-0.05349	1.53761	-0.49493
3	0.99782	-0.16253	0.75000	-0.27381
4	0.99213	-0.09340	-1.00000	0.29875
5	1.01459	-0.26478	-1.20000	0.59823
6	1.01153	-0.25280	-1.80000	0.89924

表一2 250 MW 負荷における発電機出力, 総燃料費, 送電損失
($V_1=1$ (p. u) の場合)

Table 2. Output of generator, total fuel cost, transmission loss at 250 MW Load

負 荷 (MW)	発 電 機 出 力 (MW)			総 燃 料 費 (千円/h)	送 電 損 失 (MW)
	G_1	G_2	G_3		
250	130.556 (130.447)	88.241 88.192	40.557 40.711)	407.913 (407.922)	9.355 (9.350)
300	149.325 (149.230)	107.061 107.029	56.549 56.701)	495.124 (485.182)	12.934 (12.959)
350	168.168 (168.097)	126.127 126.113	72.920 73.041)	586.899 (586.974)	17.216 (17.251)
400	195.047 (194.993)	153.761 153.726	75.000 75.000)	684.807 (684.650)	23.809 (23.720)

表一3 種々の基準電圧値における最適解

Table 3. Optimal solution for various values of reference voltage

(a) 負荷=250 (MW)

基 準 電 圧 V_1	ノード電圧の大きさ (p. u)					送 電 損 失 (p. u)	総 燃 料 費 (千円/h)
	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6		
1.05	1.05179	1.06078	1.05226	1.07146	1.06900	0.08536	406.467
1.04	1.04167	1.05063	1.04216	1.06141	1.05893	0.08691	406.740
1.03	1.03155	1.04045	1.03203	1.05132	1.04883	0.08880	407.020
1.02	1.02138	1.03021	1.02180	1.04113	1.03856	0.09013	407.308
1.01	1.01112	1.01976	1.01149	1.03072	1.02825	0.09181	407.605
1.00	1.00105	1.00970	1.00147	1.02080	1.01830	0.09355	407.913
0.99	0.99122	0.99977	0.99184	1.01087	1.00836	0.09529	408.224
0.98	0.98111	0.98987	0.98163	1.00124	0.99859	0.09716	408.555
0.97	0.97098	0.97971	0.97149	0.99120	0.98853	0.09905	408.893
0.96	0.96085	0.96957	0.96136	0.98118	0.97849	0.10101	409.242
0.95	0.95072	0.95940	0.95121	0.97114	0.96842	0.10302	409.602

(b) 負荷=300 (MW)

基 準 電 圧 V_1	ノード電圧の大きさ (p. u)					送 電 損 失 (p. u)	総 燃 料 費 (千円/h)
	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6		
1.05	1.05066	1.05973	1.05105	1.07237	1.06978	0.11767	442.998
1.04	1.04045	1.04940	1.04082	1.06213	1.05944	0.11985	493.398
1.03	1.03023	1.03903	1.03055	1.05185	1.04917	0.12213	493.811
1.02	1.02000	1.02866	1.02030	1.04159	1.03890	0.12446	494.233
1.01	1.00977	1.01827	1.01003	1.03129	1.02861	0.12686	494.671
1.00	0.99952	1.00785	0.99975	1.02098	1.01829	0.12934	495.124
0.99	0.98925	0.99741	0.98945	1.01064	1.00796	0.13195	495.602
0.98	0.97897	0.98692	0.97912	1.00025	0.99758	0.13455	496.077
0.97	0.96868	0.97643	0.96880	0.98987	0.98720	0.13729	496.578
0.96	0.95838	0.96590	0.95845	0.97945	0.97680	0.14012	497.098
0.95	0.94804	0.95532	0.94807	0.96897	0.96634	0.14315	497.655

(c) 負荷=350 (MW)

基準電圧 V_1	ノード電圧の大きさ (p.u)					送電損失 (p.u)	総燃料費 (千円/h)
	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6		
1.05	1.04831	1.05573	1.04842	1.06987	1.06733	0.15614	583.895
1.04	1.03863	1.04685	1.03876	1.06150	1.05873	0.15908	584.443
1.03	1.02832	1.03631	1.02841	1.05107	1.04831	0.16219	585.026
1.02	1.01799	1.02573	1.01804	1.04060	1.03786	0.16552	285.652
1.01	1.00764	1.01510	1.00763	1.03008	1.02736	0.16886	586.279
1.00	0.99728	1.00446	0.99723	1.01956	1.01685	0.17216	586.899
0.99	0.98689	0.99376	0.98678	1.00897	1.00629	0.17572	587.569
0.98	0.97645	0.98298	0.97624	0.99828	0.99565	0.17957	588.294
0.97	0.96603	0.97220	0.96576	0.98763	0.98502	0.18340	589.018
0.96	0.95560	0.96140	0.95530	0.97698	0.97440	0.18719	584.738
0.95	0.94507	0.95047	0.94466	0.96614	0.96359	0.19193	590.553

(d) 負荷=400 (MW)

基準電圧 V_1	ノード電圧の大きさ (p.u)					送電損失 (p.u)	総燃料費 (千円/h)
	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6		
1.05	1.04551	1.05248	1.04518	1.06870	1.06561	0.21217	680.164
1.04	1.03503	1.04167	1.03467	1.05802	1.05493	0.21694	681.018
1.03	1.02450	1.03077	1.02404	1.04720	1.04413	0.22191	681.908
1.02	1.01400	1.01990	1.01351	1.03648	1.03339	0.22704	682.830
1.01	1.00342	1.00889	1.00283	1.02555	1.02248	0.23246	683.797
1.00	0.99280	0.99782	0.99213	1.01459	1.01153	0.23809	684.807
0.99	0.98220	0.98676	0.98147	1.00368	1.00060	0.24394	685.858
0.98	0.97154	0.97557	0.97095	0.99256	0.98952	0.25007	686.959
0.97	0.96088	0.96438	0.96000	0.98150	0.97845	0.25648	688.110
0.96	0.95012	0.95311	0.94912	0.97039	0.96731	0.26322	689.323
0.95	0.93931	0.94171	0.93821	0.95912	0.95604	0.27029	690.597

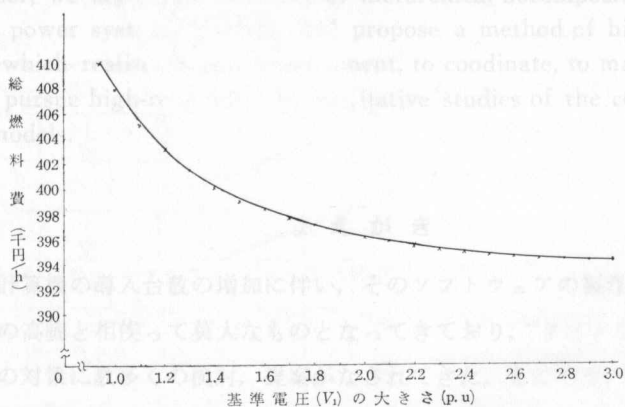


図-5 基準電圧と総燃料費の関係

Fig. 5. Relation between reference voltage and total fuel cost

から最適ノード電圧の大きさがノード2および4で単位値よりも小さくなっており、その結果、損失が大きくなったためである。従って、 V_1 の大きさを $V_1=1$ (p. u) より大きくする、つまり、電圧レベルを上げることによって、損失およびコストの改善を行うことができるはずである。

表-3および図-5はこのことを示している。例えば負荷400 (MW) の場合、 $V_1=1.02$ 以上では、電圧の大きさの最適化を行った方が良い結果となっていることがわかりこの手法の妥当性が得られた。なお、以上の例ではすべての負荷レベルにおいて有効電力と無効電力負荷の割合(負荷力率)は一定と考えた。

7. む す び

無効電力を考慮した、一般的な潮流最適化問題へのDC法の適用の可能を示した。現実の系統運用ではノード電圧の大きさには、一定の許容範囲が考慮されていること、また、線路潮流についても同様な制約があることを考えて、これらの諸制約に対応できる手法の開発を、実規模系統への適用という点をも含めて、今後の研究課題としたい。

参 考 文 献

- 1) 山城 迪： 電力潮流の最適化。北見工大研究報告，第8巻1号(1976)。
- 2) 山城 迪： 電力潮流の最適化，(第2報)。北見工大研究報告，第8巻2号(1977)。
- 3) 中村陽一・他： 電力潮流の最適化(第3報)。北見工大研究報告，第9巻1号(1977)。
- 4) 山城 迪： 直流法による電力潮流最適化。電気学会論文誌B分冊，Vol. 99, No. 11(1977)。

