1995年度日本オペレーションズ・リサーチ学会
春季研究発表会

配電負荷切替問題のアルゴリズム

広島県立大学　青木兼一　AOKI kenichi
広島県立大学　*王　剛　WANG gang

1．負荷切替問題

配電系統に事故が発生した場合、スイッチ操作により事故区間を分離し、その結果停電となった健全部分系統をスイッチ切替操作により停電を回復する問題を、事故時負荷切替問題ということになる。

スイッチ操作による負荷切替問題には、作業停電や負荷の平滑化をはかる常時負荷切替問題もある。この常時の負荷切替問題は操作に時間的余裕があるが事故時の問題は停電を迅速に回復しなければならないので、この問題の主要な課題である。

この負荷切替問題はスイッチのON,OFF操作を伴うので，組合せ問題となり、大都市系統では、組合せの数が多く，操作が複雑になる。

筆者は、この問題を1980年代に研究していたが[1]~[3]，本文では、この問題を系統的に整理し、厳密な定式化，近似アルゴリズム，データ構造を明確にするものである。

2．負荷切替問題の定式化

2．1　グラフ・木

配電系統を表す単純無向グラフを$G(X,Y)$と表す。ここにXは供給点（フイーダーの根本）および等価負荷を表すノード集合、Yはフイーダー及び等価配電線を表す枝集合を示す。

$G(X,Y)$においてフイーダーを根とする根付け木をtと表し、木の集合をTと表す。根はフイーダーの根本となるが、これをr_tまたはrと表す。$t\in T$のノード、枝集合をX_t，Y_tと表す。

配電系統は木の集合Tとして表される。Tと$G(X,Y)$には(1)式の関係がある。

$$X=\bigcup_{t\in T}X_t\ ,\ Y=\bigcup_{t\in T}Y_t\cup Y_0 \qquad \cdots \quad (1)$$

(1)式のY_0は配電系統を樹枝状にするため、スイッチにより切断された枝の集合を示す。

2．2　容量および電圧条件

$x\in X_t$には等価負荷$l_x\geq 0$が存在し、ある木はrからxにl_xを供給する単純なフロー問題を構成する。

$y\in Y_t$なる枝を考え、yを通る系図の子孫を$A(y)$と表す。ある木tにおいて、x，$x'\in X_t$なる２つのノードを結ぶパスを$p(x,x')$とする。特に$p(r,x)$は単に$p(x)$と表す。

$y\in Y_t$なる枝を流れるフローは(2)式で表わされる。

$$l_y=\sum_{x\in A(y)}l_x \qquad \cdots \quad (2)$$

yの等価抵抗をr_yと表すと、yの電圧降下は(3)式で表される。

$$v_y=r_y\,l_y \qquad \cdots \quad (3)$$

r，$x\in X_t$とし、r,xの電圧をv_r,v_xと表すと、(4)式が成立する。

$$v_x=v_r-\sum_{y\in p(x)}v_y \qquad \cdots \quad (4)$$

$y\in Y_t$には等価配電線またはスイッチ容量があり、これをC_yと表す。容量制約を考慮する必要のある枝集合をB_tと表すと、(5)式の制約条件が成立する。

$$C_y\geq l_y\ ,\ y\in B_t \qquad \cdots \quad (5)$$

$x\in X_t$の電圧の下限を$\underline{v}_x$と表す。電圧降下制約を(6)式で表す。

$$v_x\geq \underline{v}_x \qquad \cdots \quad (6)$$

電圧降下制約を考慮すべきノード集合を$D_t\subset X_t$と表すと、(6)式は(7)式のようになる。

$$v_x\geq \underline{v}_x\ ,\ x\in D_t \qquad \cdots \quad (7)$$

2．3　負荷切替問題の定式化

簡単のため、単一事故の場合の負荷切替問題を定式化する。多重事故の問題も同様に定式化される。

事故前の木の集合をT^0と表し、事故の発生した木を$t^0 \in T^0$，$y^0 \in Y_{t^0}$なる枝が遮断され、$A(y^0)$なるノード集合が停電となったものとする。T^0と根を同一とする木の集合をT^1と表す。T^1は(8)式の条件を満足する。

$$y^0 \notin \bigcup_{t \in T^1} Y_t$$
$$\left\{ \bigcup_{t \in T^0} X_t - A(y^0) \right\} \subset \bigcup_{t \in T^1} X_t \quad \cdots \quad (8)$$

$F \subset A(y^0)$なる部分集合Fを考える。負荷切替問題は(9)式のように定式化される。

$$\max_F \sum_{x \in F} l_x$$
$$\text{sub.} \quad C_y \geq l_y \,,\ \forall y \in B_t$$
$$v_x \geq \underline{v}_x \,,\ \forall x \in D_t \,,\ \forall t \in T^1$$
$$F \subset \bigcup_{t \in T^1} X_t \quad \cdots \quad (9)$$

(8)式の第１式は事故配電線を$G(X,Y)$から除くこと、すなわち$y^0 \notin Y$を示している。第２式は停電回復を行う場合、$A(y^0)$以外の負荷は停電させてはならないことを示している。

以下、(9)式で電圧降下制約を考慮しない問題を容量制約負荷切替問題、(9)式の問題を電圧降下制約負荷切替問題ということにする。

3　負荷切替問題のアルゴリズム

負荷切替問題の近似アルゴリズムは緩和法，双対法[5]等を用い，データ構造は適当に構成されているものとする。容量制約，電圧降下制約とも，その特徴をいかしたアルゴリズムが作られているが，ここでは，容量制約の袋に品物を入れるアルゴリズムのみを述べる。容量制約では，このほかに袋の品物をつめかえる，袋の品物を捨てるアルゴリズム等が存在する。

$x' \in R(x)$なるノードを品物、$l_{x'}$は品物の重量と考え、$C(x)$を袋の容量とし、文献[1]の袋に品物をいれるアルゴリズムを考える。

T^1の初期値は、T^0で$A(y^0)$を除いた木の集合とする。以下の計算を行う。

$$C_m = \max_{\substack{x \in Q_t \\ t \in T^1}} C(x) \quad \cdots \quad (10)$$
$$l_m = \max_{x' \in R(x)} l_{x'}$$
$$\text{sub.} \quad l_{x'} \leq C_m \quad \cdots \quad (11)$$

袋に品物を入れるアルゴリズムは以下のようになる。

1).　T^1の初期値を選ぶ。

2).　(11)式を満足するl_mが存在するならば、l_mを袋C_mに入れる。したがって(10)式を満足するxの存在する木には、l_mに対応するAのx'が接続される。

3).　2)に従い、A，T^1, $C(x)$を更新する。

4).　2)で(11)式を満足する$l_{x'}$が存在しない場合は、C_mとなる$x \in Q_t$を除き、(10)式を求め、2)を行う。

参考文献

[1]K•Aoki etall:　A New Algorithm for Service Restoration in Distribution Systems,1989,IEEE Trans Power Delivery,pp.1832-1839

[2]K•Aoki etall:Voltage Drop Constrained Restoration of Supply by Switch Operation in Distribution Systems,1988,IEEE　Trans.Power Delivery,pp.1267-1274

[3]K•Aoki etall: Totally Automated Switching Operation in Distribution Systems,1990,IEEE Trans Power Delivery,pp.514-520

[4]茨木俊秀:アルゴリズムとデータ構造 昭晃堂, 1989

[5]今野浩,鈴木久敏:整数計画法と組合せ最適化 日科技連, 1982