

GIS 母線ループ電流遮断と遮断特性評価法

吉 永 淳*

The interruption of the loop current in the GIS bus line and the evaluation of the thermal characteristics and interrupting capability using the arc models

Kiyoshi Yoshinaga

The arc models simulating the interrupting phenomena near current zero and evaluating the loop current interrupting capability were investigated. The evaluation using the various arc models, such as the Mayr model, Cassie-Mayr switching model, showed different performance in the case of the large arc time constant. This suggests the arc model used for the evaluation of the interrupters with newly developed gasses of large arc time constant is to be reviewed as the interrupting condition. The evaluation using the proposed modified Mayr model(md-model ②) showed a good fit for experimental data, and proved to be quite useful for the simulation of the loop current interruption.

1. まえがき

GIS 用断路器の重要な責務に母線ループ電流遮断がある。母線ループ遮断電流は数 kA レベルであるが、遮断直後の過渡回復電圧は母線回路共振による高周波振動となるため、熱的再発弧による遮断失敗の生じる確率が高い。SF₆ ガス遮断器など開閉器の電流遮断能力を解析評価するためのアーク動特性として、Mayr モデルによる遮断能力評価が多く用いられてきた。しかし断路器は遮断器にくらべ開閉速度がゆるやかであり、またピストンを使用したパuffa 作用によるガス吹き付けがなく、熱パuffa による自力消弧作用に頼ることが多い。したがって断路器の遮断現象を考慮したより適切なアークモデルによる遮断能力の解析的評価法の開発が求められている。

また GIS 用断路器には消弧媒体として SF₆ ガスが用いられている。SF₆ ガスはアーク時定数が小さく消弧能力に優れているが、近年 SF₆ ガスは温暖化ガスの一つとして規制対象ガスに指定され、現在代替ガスの使用が検討されている。代替ガスとしては、SF₆ ガスに他のガスを分圧混合した混合ガス、あるいは CO₂、N₂ ガスなどが検討されているが、いずれも純粋 SF₆ ガスにくらべアーク時定数が大きくなるという問題がある。したがって時定数の大きいガス中での電流遮断におけるアークモデル開発・評価が必要となっている。

このような状況から断路器の GIS 母線ループ電流遮断において、これまで遮断器に使用されてきた各種アークモデルによる遮断現象と遮断の能力評価の適用性および GIS 用断路器の特性を表すより有用なアークモデルの開発研究を行った。

* 電気電子工学科

2. GIS 母線ループ電流遮断と回路現象

2. 1 ループ電流遮断現象⁽³⁾

ループ電流遮断現象は、甲乙複母線切替時に発生する現象である。Fig.1 (a) のように断路器①②を介して甲母線より負荷に電力を供給している時、乙母線に切替える必要が生じた場合、先ず③を投入して両母線を使って負荷に電力を供給する。このとき②-CB-③でループが構成される。次に②を開くと、②の断路器はループを分離する。すなわちループ電流遮断を行うことになる。Fig.1(a)の回路は(b)のように表わすことができる。断路器(DS)は Fig.1 (a) の②に相当し、ループ電流 I_1 を遮断する。電源インピーダンス (ωL_s) と負荷インピーダンス (ωL_L) はループのインピーダンス ($\omega L_1 + \omega L_2$) に比べて非常に大きいので負荷電流 (I) は一定であり、ループ電流は ωL_1 、 ωL_2 と DS のアーク特性により変化することになる。遮断電流は I_1 と I_2 と2つに分かれるため定格電流以下となるが、2つのループの長さが大きくことなる場合も考慮し定格電流の遮断が要求される。回復電圧はループの長さによるが数百 V であり、過渡回復電圧は遮断電流と、GIS のサージインピーダンス (Z) で決まる。

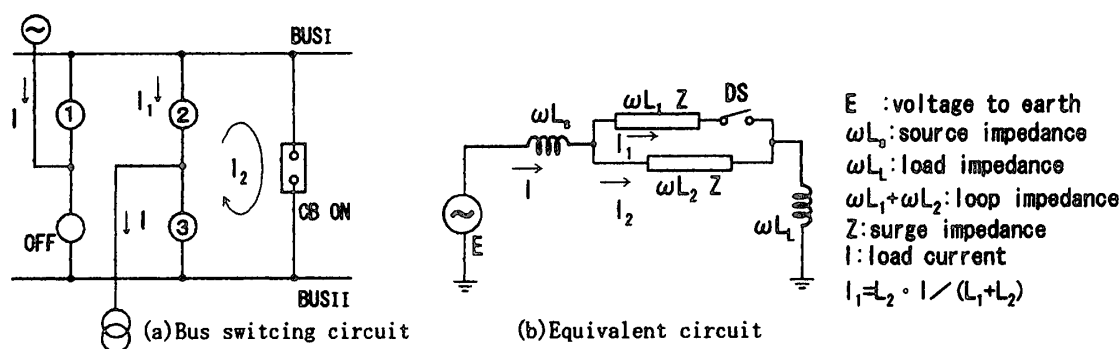


Fig.1 Loop current interrupting circuit

2. 2 GIS 母線構造と回路パラメータ

ここでは 500kV GIS 変電所における母線ループを主対象として、ループ長と母線パラメータを選定、電圧 300V、ループ電流最大値 8 kA、線路サージインピーダンスは、母線インピーダンスの計算値・実測値などに基き 80Ωとした。GIS の母線部は Fig.2 に示すように同軸円筒形状であり、機器部は形状が異なるが、全体ループのパラメータはほとんど母線部で決まる。

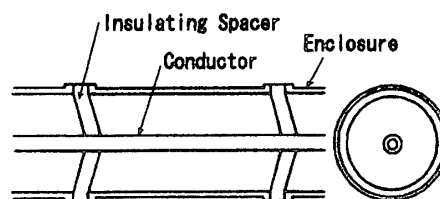


Fig.2 Sectional diagram of the bus for GIS

2. 3 過渡回復電圧

Fig.3 (a) の回路において、母線回路は無損失回路とし、サージインピーダンス Z 、伝播定数 γ について次の関係が成立すると仮定する。

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \gamma = \sqrt{(sL)(sC)} = s\sqrt{LC} = s\sqrt{LC} \quad \omega Ll \in \frac{1}{\omega cl}$$

ただし L : 単位長あたりのインダクタンス、 C : 単位長あたりのキャパシタンス、 s : 複素周波数、 l : 線路長とする。進行波法によれば、受端短絡における応答 E_2 は Fig.3(b) のような波形となる。この E_2 を s 関数に変換するため Fig.3(c) の s 関数 $F(s)$ を利用する。 $F(s)$ は

$$F(s) = \frac{E_m}{\left(\frac{T}{2}\right)s^2} \left(1 - 2e^{-\frac{T}{2}s} + e^{-Ts}\right) \quad \text{と表わされるから、推移則を適用すれば}$$

$$E_2(s) = \frac{E_m}{\left(\frac{T}{2}\right)s^2} \left(1 - 2e^{-\frac{T}{2}s} + e^{-Ts}\right) \frac{1}{1 + e^{-Ts}} e^{\frac{T}{2}s} = \frac{E_m}{\left(\frac{T}{2}\right)s^2} (e^{-Ts} - e^{-2Ts} + \dots)$$

となる。この式を逆変換して傾斜関数を得られる。 E_m 、 T に GIS 母線のパラメータを設定し 300V、8 kA、 $Z=80\Omega$ における回路固有の過渡回復電圧の計算を行った。Fig.3(d) に計算波形を示す。

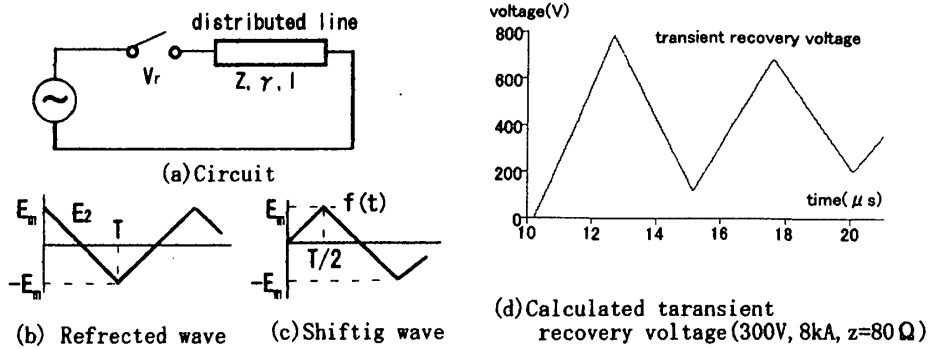


Fig.3 Loop current interrupting circuit & calculated transient recovery voltage

3. アークモデルと開閉器への適用

3. 1 基本動特性 (1) (2)

ガス開閉器内に発生するエネルギー損失機構は複雑であるが、エネルギー平衡が保たれていると考えると一般式は次のように表現できる。

$$\{\text{保有熱量}\} + \{\text{径方向対流損}\} + \{\text{軸方向対流損}\} + \{\text{膨張冷却損}\}$$

$$\{\text{熱伝導損}\} + \{\text{分子拡散損}\} + \{\text{乱流拡散損}\} + \{\text{放射損}\} = \{\text{電気入力}\} \quad (3.1)$$

厳密にはこれらの項全てを考慮した解析が必要である。一般にはアークプラズマのエネルギー平衡式は次のように表される。

$$\sigma E^2 = \sigma \frac{Dh}{Dt} - q \cdot \text{grad}p + S(T) - \text{div}k \cdot \text{grad}T \quad (3.2)$$

ここで σ はプラズマの電気伝導度、 E は電界、 ρ は密度、 h はエンタルピーであり、 $-q \cdot \text{grad}p$ 、 $S(T)$ 、 $-\text{div}k \cdot \text{grad}T$ はそれぞれ等エントロピー的冷却、放射、熱伝導によるエネルギー損失を表す。これらの損失を表現して解析するには種々の仮定を行う場合が多い。

ここではアークの損失を一括して P で表し、アークに注入されるエネルギー ei (e ; アーク電圧、 i ; アーク電流) に対しこのエネルギーの一部は毎秒 P ずつ持ち去られ、残りはアークに蓄積されるとする。アークの保有熱量を Q とすると、毎秒当たりの変化は $\frac{dQ}{dt}$ で表されエネルギー平衡式は大局的には次のように表せる。

$$\frac{dQ}{dt} + P = ei \quad (3.3)$$

< Cassie の式 (Cassie モデル) >

アークコンダクタンス g 、熱損失 P 、保有熱量 Q の単位長当たりの値を、断面積 S に対して

$$G = S\sigma, \quad P = S\alpha, \quad Q = Sc \quad (3.4)$$

ただし S : 断面積、 σ : 導電率、 α : 熱損失率、 c : 比熱である。これを(3.3)式に入れると

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta} \left(\frac{ei}{P} - 1 \right) \quad \text{ただし } \theta = \frac{c}{\alpha} \quad (\text{アーク時定数}) \quad (3.5)$$

さらに $E_s^2 = \alpha / \sigma$ $i = ge$ とおくと

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta} \left[\left(\frac{e}{E_s} \right)^2 - 1 \right] \quad (3.6) \quad \text{ここで } E_s \text{ は定常アーク電圧で一定としている。}$$

< Mayr の式 (Mayr モデル) >

Mayr は $\frac{dQ}{dt} + P = ei$ (3.7) において $P = N$ (一定) とし $g = K \exp(Q/Q_s)$ の関係を仮定し

た。ここで K は定数、 Q_s はアーク周辺温度を基準にとった気体中の蓄積エネルギーに相当する。

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta} \left(\frac{ei}{N} - 1 \right) \quad (3.8)$$

であり、 $N = -q \cdot \text{grad}p + S(T) - \text{div}k \cdot \text{grad}T$ を一定としている。ここで θ はアーク柱の蓄積エネルギー対熱損失であり、アーク時定数と呼ばれ、アーク柱と周囲気体のエネルギー交換の速さを示す。

Cassie の式は定圧比熱が大きいアーク弧心の平衡式を主体としたもので、大電流領域のアーク特性を表すのに適している。アークは電流近傍に達すると温度の高い弧心部が消滅して外炎部のみが残存する。したがって電流遮断には外炎部の動特性が重要になる。外炎部は定圧比熱が比較的小さく導電率の温度変化が著しくなる。Mayr モデルは導電率変化を主体としたもので零点近傍の動特性をよく表しており、 SF_6 ガス遮断器の零点近傍における遮断現象および遮断成否の解析に多く用いられてきた。

3. 2 アーク時定数と気体、ガス圧、流速 (2) (4) (5)

アークの導電率の変化が支配的で、熱伝導で冷却されるアークについて、ガスの静止状態におけるアーク時定数とガスの特性およびアークの形状との関係は次式で示される。

$$\theta = \frac{r_0^2}{2.4^2 \kappa} \quad \text{ただし } r_0 : \text{アークの半径 (cm)、} \kappa : \text{熱拡散率 (cm}^2/\text{s)}$$

この式で計算した理論値と実験値例を Table1 に示す。

arc time-constant	SF ₆	O ₂	CO ₂	Air	N ₂
θ (theoretical value)	1.3 μ s	2.2 μ s	12.5 μ s	37 μ s	95 μ s
θ (experimental value)	0.8	1.5	15.0	80	210

Table 1 Arc time-constant for the various gasses (current: 1 A, pressure: 1 atm)

Table 1 に示された値は電流 1 A のアークで静止気圧に対するもので、ガス圧力、ガス流速の大きい開閉器による電流遮断時の時定数値とは異なるが、SF₆ ガスの時定数に対し、他のガスでは時定数が大きくなる。またアーク時定数は気体の種類の他に圧力、気体の流動状態、遮断電流などの影響を受ける。Fig. 4 に、空気吹付けアークでみた、アーク時定数と流速の関係の測定例を示す。実際の遮断器、断路器などでのアーク時定数は設計などにより異なってくるため実測が必要である。

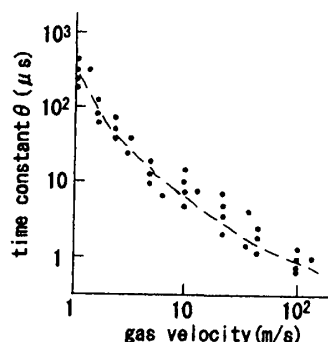


Fig. 4 Air-gas-velocity vs arc time-constant

3. 3 GIS 用断路器適用のアークモデル検討

GIS 用断路器アーク遮断の特徴は①コンタクト開離速度が比較的小さい。②パuffa作用ピストンを備えていない場合が多く、熱パuffaによるガス流による自力消弧形が一般的である。③このことから、母線ループ電流遮断におけるアーク時間は1～3サイクル程度と、長いアーク時間となる。したがって遮断成否のみの判定は、零点近傍の解析を行えばよいが、アーク期間のシミュレーションを行うには長いアーク時間で、零点を数回通過する解析が必要となる。

したがって①吹付け力の低下した状況で熱的变化を表現するアークモデル ②数サイクルのアーク時間を表現できるモデルが必要となる。ここでは次のモデルを検討した。

<Mayr-Cassie 切替モデル (C then M model) >

電流がある値より大きいときは Cassie モデル、ある値より小さいとき Mayr モデルとし、アーク期間の電流値によって切替を行う。(Fig.5 参照)

電流零点で切替えるモデルは、SF₆ ガス開閉器での遮断シミュレーションでは、実試験データと良く一致することが報告されている。(3) しかし長いアーク期間では零点近傍が数回あり、切替時の不連続性およびアーク時定数が大きくなった場合の特性検証が必要である。

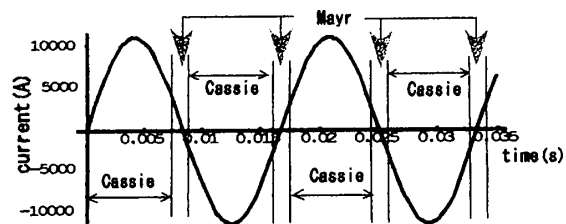


Fig.5 Cassie-Mayr switching and current

<変形-Mayr モデル (md-model) >

断路器では単位時間当たりの損失は遮断器と比べ小さい。このため次のモデルを検討した。コンダクタンス g と蓄積エネルギー、およびアークの保有熱量の変化が

$$g = K \exp(Q/Q_s) \quad \frac{dQ}{dt} + P^\delta = (ei)^\delta \quad (3.9) \quad \text{の関係にあると仮定する。}$$

損失 P を一定値 N としたときコンダクタンスの変化は次のようになる。

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta} \left\{ \left(\frac{ei}{N} \right)^\delta - 1 \right\} \quad \left(\theta = Q_s / N^\delta \right) \quad (3.10)$$

零点近傍の切替は上記のような問題があるため、定常アーク電圧の小さい Cassie および変形 Mayr を直列にとしてアークを表すモデルでの遮断計算を行った。

Cassie の式と (3.10) を直列とした変形 Mayr モデルにおいて、 δ を変化したときの零点近傍のアーク電圧とアークコンダクタンスの計算例を Fig.6 示す。回路は 300V、8kA、80 Ω の回路を使用している。

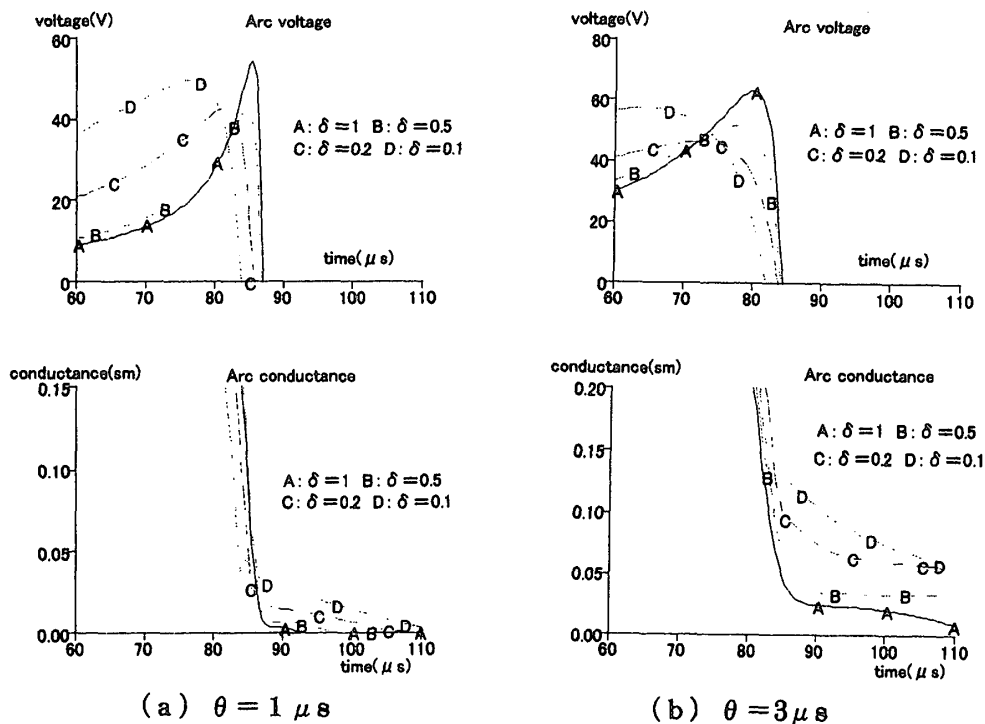


Fig.6 Calculated arc voltage and conductance for modified Mayr model

Fig.6 に見られるように $\delta = 1$ ではアークコンダクタンスは電流零点近傍で急速に低下し、0.05sm 以下となり、これにともなって、アーク電圧も立ち上がり消弧ピークを形成する。 $\delta = 0.5$ でも同様であるが消弧ピークは下がっている。これに対し $\delta = 0.2$ になると零点近傍のコンダクタンスは緩やかとなり、アークコンダクタンス ≈ 0 になるには時間を要し、残留電流期間が長くなる。 $\delta = 0.1$ ではコンダクタンス変化が極度に緩やかで 0.05 以下になるのが難しい。

このように δ の低下は、アーク損失の低下を表現して、零点現象が変化する。したがって断路器のようにガス吹付けが小さい遮断現象を表現する有力な手段となる。

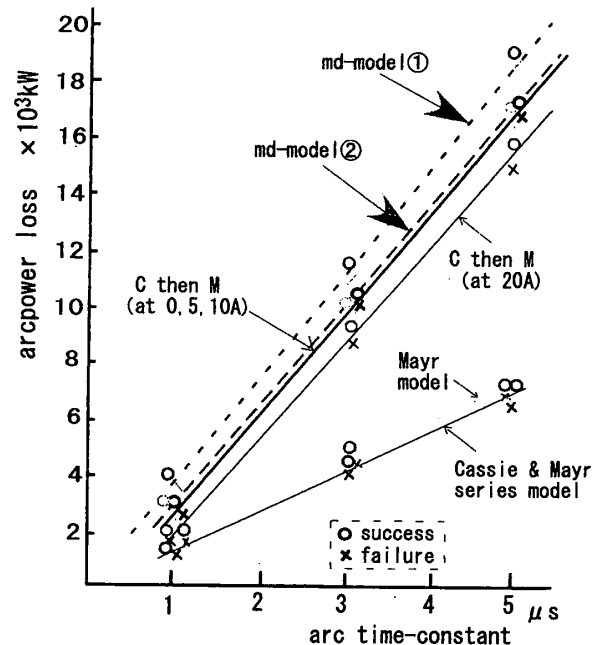
4. 遮断シミュレーション

4. 1 アークモデルと遮断限界

定アーク損失・時定数の各種アークモデルを使用した零点近傍の解析によって、アーク時定数が変化したときの遮断限界となるアーク損失を求めた曲線を Fig.7 に示す。(回路条件: 300V 8kA, $Z=80\Omega$) それぞれのモデルにおいて、描かれた曲線より下部では遮断成功、曲線より上部では遮断失敗となるアーク損失を示している。各アークモデルは左の表に示す特性式に対応し、Cassie、Mayr、modified-Mayr の特性式を使った単独モデル、または直列モデル、電流 (0A、5A、10A、20A など) により切替えるモデルを使用している。ただ Cassie モデルの定常アーク電圧は断路器の特性を考慮して 20V と低いレベルに設定している。

Arc model	Arc characteristics
Cassie	$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta} \left[\left(\frac{e}{E_s} \right)^2 - 1 \right]$
Mayr	$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta} \left(\frac{ei}{N} - 1 \right)$
md-model ①	Cassie & modified Mayr $\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta} \left\{ \left(\frac{ei}{N} \right)^\delta - 1 \right\}$ series model: $\delta = 0.17$
md-model ②	Cassie & modified Mayr series model: $\delta = 0.2$
C then M (0.5, 10 A)	Cassie at current > 0.5, 10 A Mayr at current $\leq 0.5, 10$ A

Arc models



Arc time constant vs arc power loss
in the interrupting limit area

Fig.7 Calculated interruption limit curves for the various arc models

Fig.8 に md-model②および C then M(5A)のモデルで計算した過渡回復電圧、電流、アークコンダクタンスの時間変化を示す。(アーク時定数 θ : 1、3、5 μ s) 零点近傍現象では、零点直後のアークコンダクタンスが md-model②の場合やや大きく残留電流持続が長い。これは δ により零点後の損失が低減されていることによる。

Fig.7、Fig.8 に示した計算結果から次のようなことが分かる。①Mayr モデル単独と Cassie(E_s 20V レベル)および Mayr モデルによる遮断限界にはあまり差異がない。②Cassie、Mayr 切替モ

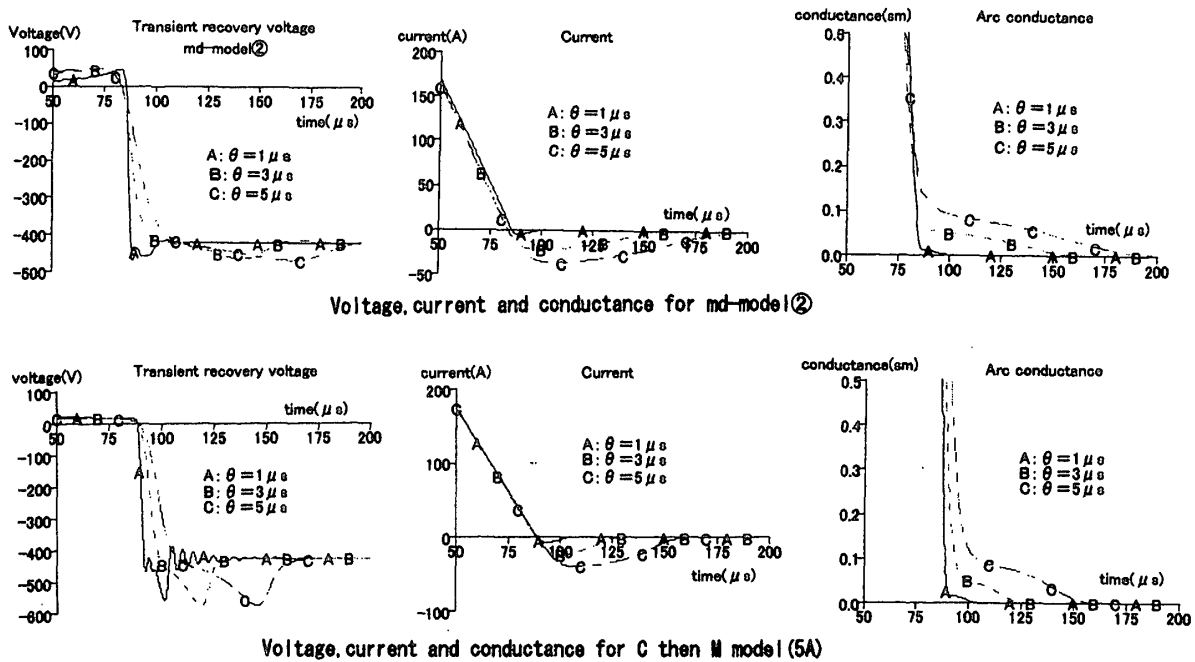


Fig.8 Recovery voltage, current and conductance at the interruption using 2 models

デルでは切替電流 0~10A レベルでは殆ど差異が見られない。しかし 20A 以上になると遮断が容易となり、遮断限界は切替電流が大きくなるにしたがって Mayr モデルに近くなる。③アーク時定数 $1 \mu s$ 以下では、各種モデルで遮断限界の差異が小さいが、アーク時定数が大きくなると、Mayr モデルと、Cassie-Mayr 切替モデルの差異が大きくなる。したがってこの傾向を考慮したモデル選定が必要である。④変形 Mayr モデルは、 $\delta \approx 0.2$ において、Cassie-Mayr 切替モデル（切替電流 0A 近辺）とほぼ同等の遮断限界曲線を示し、零点近傍のアーク現象は断路器の実測データにほぼ近い変化を示す。零点近傍ではコンダクタンス変化に差異がみられる。損失のコンダクタンス依存性については今後検討する。

断路器の母線ループ電流遮断においては、切替モデルとほぼ遮断限界が同等な md-model② ($\delta = 0.2$) が有効である。特に長いアーク期間でスイッチング無しで計算が可能である。また断路器の消弧方式等に対し δ の値を変化することで実機対応が可能であると考えられる。

5. 結言

遮断シミュレーションにより GIS 母線ループ電流遮断能力評価を行うため、断路器アーク特性を示すアークモデルの検討を行った。定損失・時定数モデル検討では変形 Mayr モデル(md-model ②)が評価に有効であることを示した。損失・時定数のコンダクタンス依存モデル、長アーク遮断の検討も進めているが、別の機会に報告する。

参考文献

- (1) 潮 恒郎・大木正路：「遮断器・避雷器」 東京電機大学出版局
- (2) 電気学会編 「放電ハンドブック」
- (3) 佐久間秀一・亀井健次他：「大容量母線切替用断路器の開発」 電学開閉装置研究会資料 SPD-90-28
- (4) G. Frind: Z. Angew. Phys., Vol. 12, p231 (1960)
- (5) K. H. Yoon, H. E. Spindle: TAE, Vol. 77, p805 (1959)

(平成 16 年 12 月 1 日受理)