

コンダクタンス依存型アークモデルと電流遮断特性

吉 永 淳*

The interrupting characteristics simulation of the interrupters for GIS using the modified Mayr arc model in which the arc time constant and power loss are dependent on the arc conductance transition

Kiyoshi Yoshinaga

The modified Mayr arc model, in which the arc time constant and arc power loss are dependent on the arc conductance transition near current zero, were investigated. The interrupting capability and phenomena are much affected by the index parameters of the equation between the arc time constant and the arc conductance. The simulation results of the loop current interruption by the interrupters with low parallel resistance using the modified Mayr model showed good coincidence with experimental data.

1. まえがき

開閉機器の電流遮断特性解析にはアーク時定数、アーク損失等のアークパラメータを導入して数式化したアークモデルが使用されている。電流零点近傍の短期間においてこれらのパラメータは一定値をとると仮定して計算されることが多い。大電流遮断過程においてアークパラメータを実験的に精度よく測定するのは難しい面があるが、近年高周波電流により各種絶縁ガスのアークパラメータ特性を測定した結果、アーク時定数、アーク損失はアークコンダクタンスに対する依存性を示すことが報告されている。¹⁾ ここではアークモデルにおけるパラメータのコンダクタンス依存性を仮定したアークモデルによる遮断特性の検討を行った。ループ電流遮断用開閉器の特性評価モデルとして先にガス吹付け力を考慮した変形 Mayr モデルの検討を行った。今回このモデルにアークパラメータのコンダクタンス依存性を適用した特性を検討した。並列抵抗付開閉器における遮断シミュレーション時の電圧初期立ち上がり時間遅れは実験データとよく一致した。

2. アークコンダクタンス依存モデルとその特性

2. 1 コンダクタンス依存モデル

$$\text{Mayr モデルの関係式} \quad \frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta} \left\{ \frac{ei}{N} - 1 \right\} \quad (\text{ただし } g; \text{アークコンダクタンス、} \theta; \text{アーク時定数、} N; \text{アーク損失})$$

において、アーク時定数 θ 、アーク損失 N は電流零点近

* 電気電子工学科

傍において、一定値として扱われてきた。これに対し近年高周波小電流遮断試験から、これらのアークパラメータを実験的に求めた結果が発表されている。¹⁾ 実験による計測例を Fig.1 (周波数 27kHz の例) に示す。θ、N は電流アーク期間において一定値をとるのではなくて、コンダクタンスに依存して変化している。ここでは測定例を考慮し $\theta = A g^\alpha$ 、 $N = B g^\beta$ で表すことができるとしたアークモデルを検討した。(以下ではこれをコンダクタンス依存形 Mayr モデルと称する。)

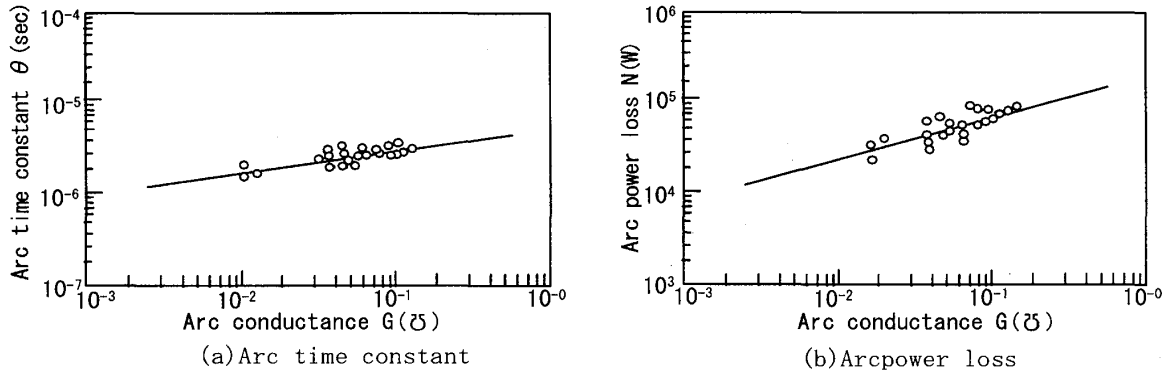
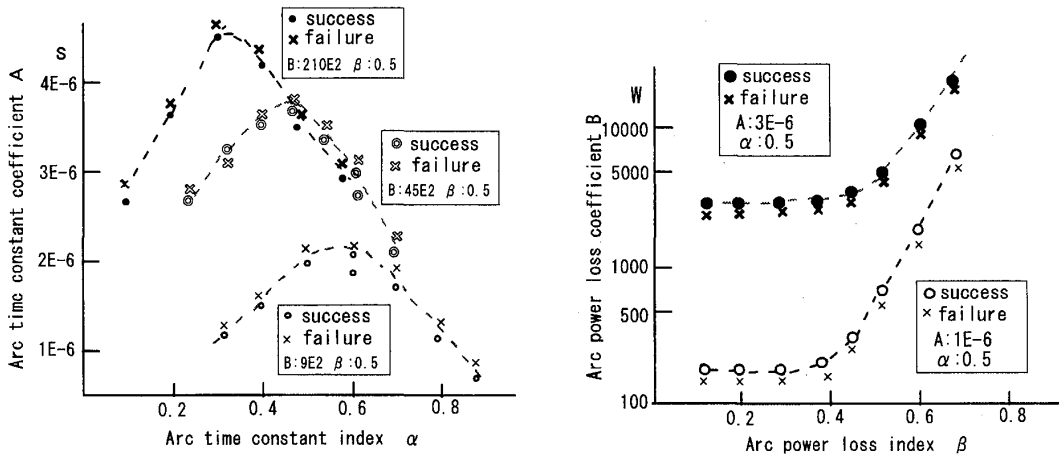


Fig.1 Example data of arc parameters obtained by measurement(27kHz) ¹⁾

2. 2 アーク時定数・アーク損失の係数・指数の電流遮断への影響 ^{2) 3)}

アーク時定数係数 A および時定数指数 α の値が電流遮断に与える影響を調べた。Fig.2 (a) に損失パラメータ B および β を一定としたとき時定数パラメータ A、α と電流遮断限界曲線 (曲線より下部は遮断成功、上部は遮断失敗) を示す。損失係数 B が極めて大きい (消弧能力が大きい) 領域では α に関係なく電流遮断が行われると考えられるが、損失が数万 W の領域の遮断限界領域では、α の影響が大きい。図に見られるように α が 0.4 ~ 0.5 近辺に比べ α が 0.2 以下、あるいは 0.8 以上では限界損失が低くなり電流遮断が厳しくなる傾向にある。また Fig.2 (b) は A を一定、α = 0.5 とし、指数 β を変化したときの遮断限界 (曲線より上部は遮断成功、下部は遮断失敗) の影響を示している。



(a) Arc time constant parameter

(b) Arc power loss parameter

Fig.2 Arc parameters and current interrupting characteristics

電流遮断成否評価ではアークパラメータのうち特に α 、 β の指数値が遮断限界に及ぼす影響が大きい。

電流遮断過程の零点近傍におけるアークコンダクタンス、アーク電圧の変化例を Fig.3 に示す。 α が0.4~0.5では消弧ピーク形成され、零点直前の高いアーク電圧が高周波電圧消弧に寄与するものと考えられる。これに対し α が0.2の場合コンダクタンスの変化は $\alpha=0.5$ の場合に近いが、消弧ピークが形成されず、遮断失敗となっている。 $\alpha=0.8$ ではコンダクタンスの変化は速いが、消弧ピークが比較的小さくなっており、遮断しにくくなっていることが分かる。 β の場合も0.4~0.7では比較的高い消弧ピークになるが、 $\beta=0.8$ 近辺ではアーク電圧、消弧ピークが極度に低下しており、この変化が遮断能力低下の要因となっている。

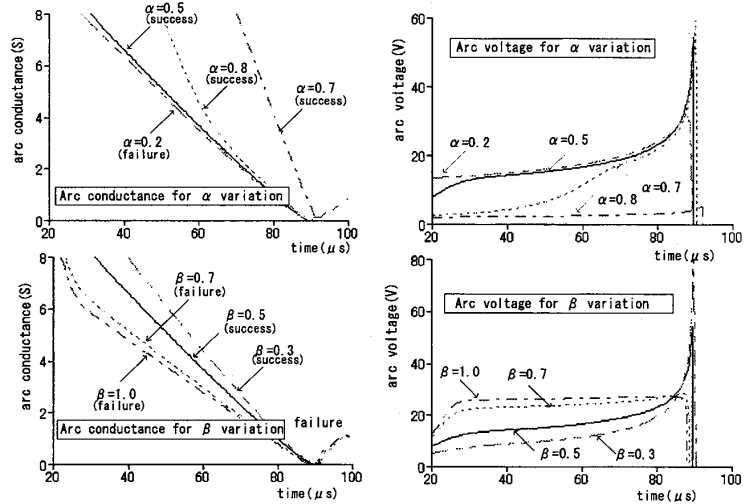


Fig.3 Arc conductance and arc voltage near current zero for α , β variation

2. 3 アークコンダクタンス依存モデルとループ電流遮断特性

300V、8000Aのループ電流回路における遮断における遮断特性検討例を Fig.4 に示す。この回路は開閉器としては電流が大きく、TRVの電圧上昇率が高い回路条件となる。図はアーク時定数指数 α が変化するとき、アーク時定数係数遮断と限界損失係数の関係を示している。

アーク時定数係数が $3\mu s$ より小さい領域では α が0.3、0.5で遮断限界が低く遮断容易となっているが、アーク時定数係数が $5\mu s$ 以上の領域では、 α が0.5、0.7と大きくなると、遮断限界が高くなっている。 α が0.3近辺では時定数係数にかかわらず、低い遮断限界を示した。図において指数 $\alpha=0.0$ はアーク

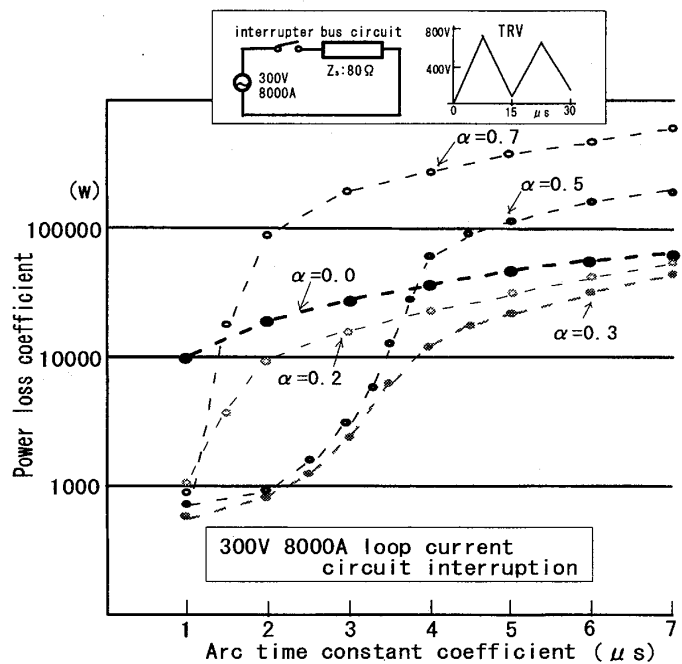


Fig.4 Interruption limit for α variation in the GIS bus loop interruption

時定数が一定であることを意味している。

Fig.5 にアーク時定数係数 $1 \mu s$ において α 値を変化したときのアーク時定数およびコンダクタンス時間的変動を示す。アークコンダクタンスの変化が $\alpha=0.5, 0.7$ では急峻で、これが遮断限界の高い要因となっている。また Fig.6 はアーク時定数係数 $5 \mu s$ の場合の電圧、電流およびアークコンダクタンス、時定数の変動状況を示している。アーク時定数が大きいため電流零点直後に残留電流が流れこれにより電圧歪が大きい。 α が 0.5 以上では電流零点前でのアークコンダクタンス変化が緩やかとなり、このため遮断限界が低下したものと考えられる。

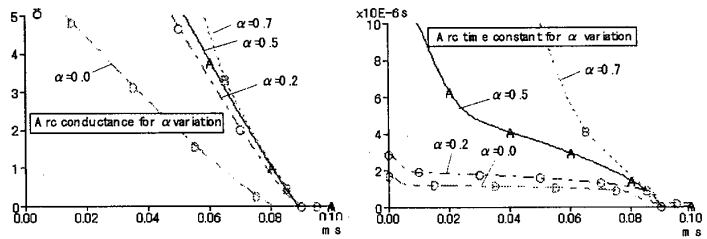


Fig.5 Arc parameters for α variation near zero (arc time constant coefficient $1 \mu s$)

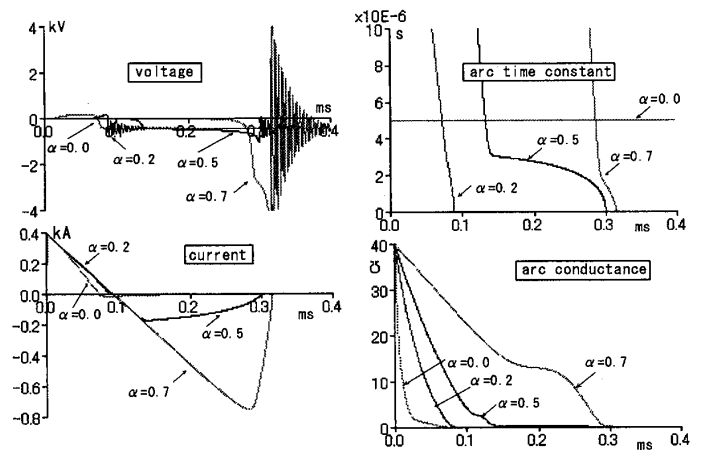


Fig.6 Arc parameters for α variation near zero (arc time constant coefficient $5 \mu s$)

3. 変形コンダクタンス依存形モデルと並列抵抗付開閉器に対する電流遮断評価

3. 1 モデルの概要 4) 5)

Fig.7 に示す並列抵抗付開閉器に関して、 N 、 θ 一定モデルによる遮断特性評価を行ってきた。4)

これに対しここではコンダクタンス依存モデルを適用した検討を行った。並列抵抗付開閉器では、遮断電流は最高 $8000A$ と大きい、TRV の上昇率は並列抵抗により大きく低減される。このため消弧室におけるガス吹きつけ力を低減する構造となることが多い。

ここでは消弧ガスの特性およびガス吹きつけ力の小さい開閉器への対応を考慮し、指数 δ を導入した式

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta} \left\{ \left(\frac{ei}{N} \right)^\delta - 1 \right\} \quad (3.1)$$

において、アーク時定数、損失が $\theta = A g^\alpha$ 、 $N = B g^\beta$ で表されると仮定した。以下にはこのモデルを変形コンダクタンス依存形 Mayr モデル [(con May) $^\delta$] モデルと称する。

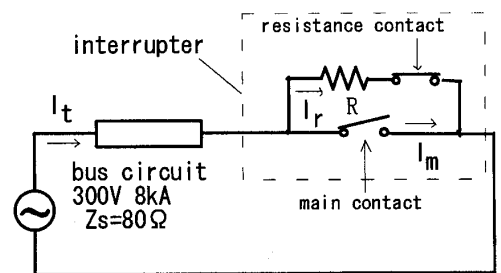


Fig.7 Loop current interrupter with parallel resistance

3. 2 δ 値と特性

(3.1) 式における指数 δ はアークコンダクタンス g とアーク保有熱量変化が

$$g = K \exp\left(\frac{Q}{Q_s}\right) \quad \frac{dQ}{dt} + P^\delta = (ei)^\delta \quad (3.2)$$

ただし Q : アークの保有熱量、 Q_s : アーク周辺温度基準の気体中の蓄積エネルギー

P : 熱損失、 K : 一定

の関係にあると仮定している。

ここでは、 δ の値は消弧ガスの吹付け力によって変化するものと考え、300V、8kAのループ電流回路において、0.2 Ω 並列回路（主コンタクト遮断で電流8kAであるがTRV上昇率は抵抗で低減）および直列回路（抵抗コンタクトの遮断で電流は抵抗で限流、TRV上昇率が高い）を遮断したときの δ 値と遮断限界の関係を計算した。計算結果例を Fig.8 に示す。

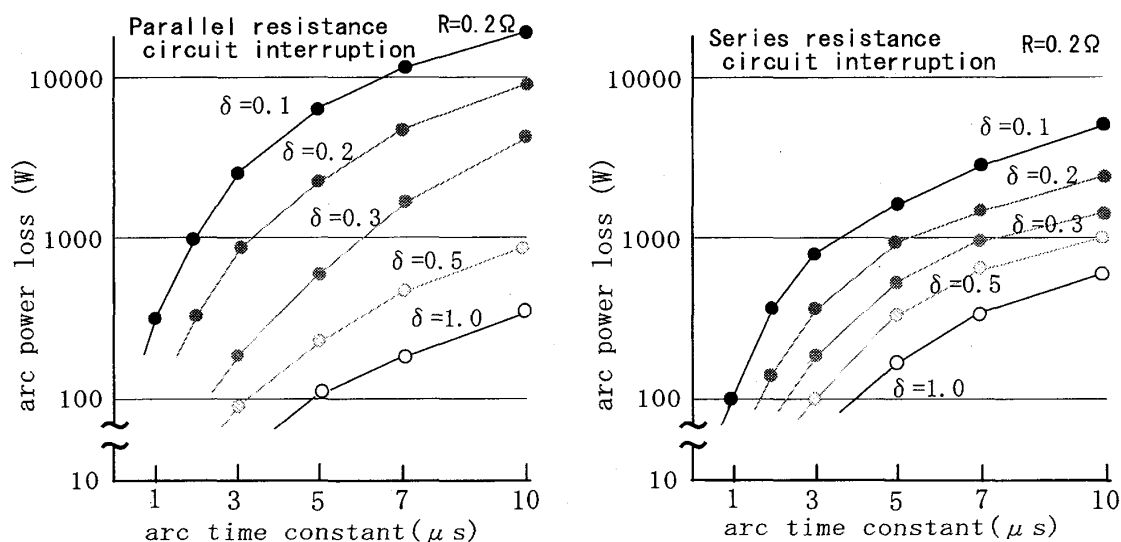


Fig.8 Interrupting characteristics for variation of δ

Fig.8に見られるように $\delta = 1$ の Mayr モデルに対して、 δ を 0.5、0.3、0.2、0.1 と小さくしてゆくと限界アーク損失係数は増大する。例えば並列抵抗 0.2 Ω 挿入、アーク時定数係数が 5 μs で、並列抵抗回路遮断では $\delta = 1$ で限界損失係数が 400 に対し $\delta = 0.5$ で約 2 倍、 $\delta = 0.3$ で約 4 倍となっている。直列回路遮断でもほぼ同様の比率で δ 値の低下と共に限界損失係数が増大している。このように δ 値は電流遮断能力を示すアーク損失と密接に関係し、ガス吹付けによる消弧能力を表すパラメータとしての使用が可能である。

3. 3 コンダクタンス依存モデルによる遮断評価と遮断現象

依存モデルを使用して 0.2 Ω の並列抵抗挿入したときの、主接点の遮断特性を求めた例を

Fig.9 に示す。α が 0.5、0.7 および 0.0 の変化例であるが、アーク時定数係数が 1 ~ 7 μs においては α が 0.0 ~ 0.1 で遮断限の損失係数は大きく、α が大きくなると限界損失係数も大きくなるという結果を得た。

並列抵抗遮断では TRV の電圧上昇率は抵抗なしの場合に比べて小さく、α 値の変動とアーク時定数係数変化により、断限界が大きく変化する現象は見られない。

電流零点近傍の電圧、電流およびアークパラメータの変化を Fig.10 に示す。図では並列抵抗回路遮断において、α の変動に対する零点近傍の電流、電圧およびアークコンダクタンス、アーク時定数の変化状況を示している。アーク時定数係数が 5 μs のケースである。α = 0.7 ではアークコンダクタンスの変化が緩やかであり残留電流が流れ、遮断限界が高くなる要因となっている。

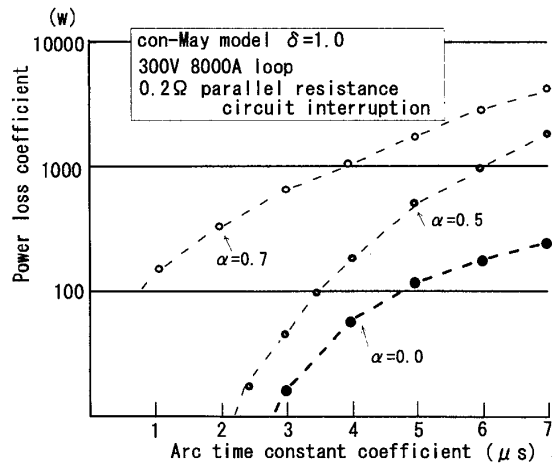


Fig.9 Interruption limit for α variation (0.2Ω parallel resistance interruption)

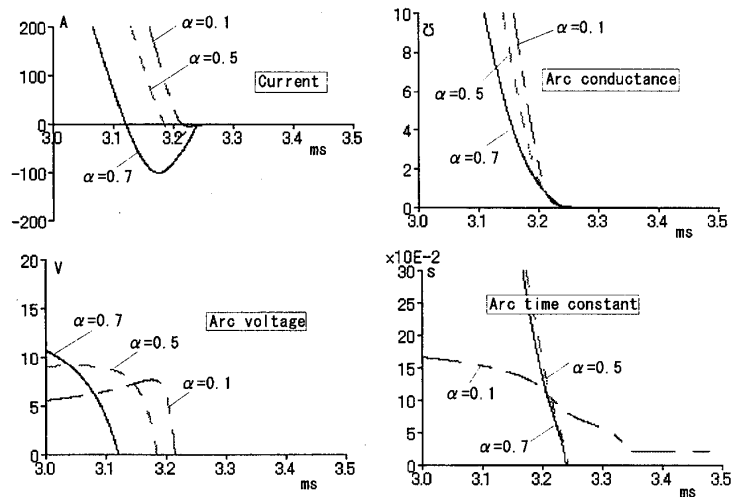


Fig.10 Arc parameters for α variation

4. Cassie の式と (conMay)^δ モデル組合せによる電流遮断評価

4. 1 直列モデル、切替モデルと遮断限界⁶⁾

SF₆ ガス開閉器モデルによるループ電流領域遮断試験における電圧・電流実測では、大電流期間におけるアーク電圧はほぼ一定であり、零点近傍ではアーク時間によって変動があるが、大抵は緩やかな消弧ピークを形成する。上記のアークコンダクタンス依存モデルのみでは、電流の大きい期間の模擬が不十分である。したがってこのようなアーク期間を模擬するために、Cassie と (conMay)^δ の直列、あるいは Cassie と (conMay)^δ の切替モデルによる遮断能力評価を検討した。

Fig.11 に直列および切替モデルを使用し、アーク時定数と限界損失の計算した結果例を示す。図において Cas+ (con-May)^{0.12} 直列と表示しているのは Cassie モデルに、δ = 0.12 の (conMay)^δ モデルを直列接続したもの、Cas-conMay 切替モデルでは電流零点近傍で Cassie モデルから (conMay)^δ モデルに切り替えている。

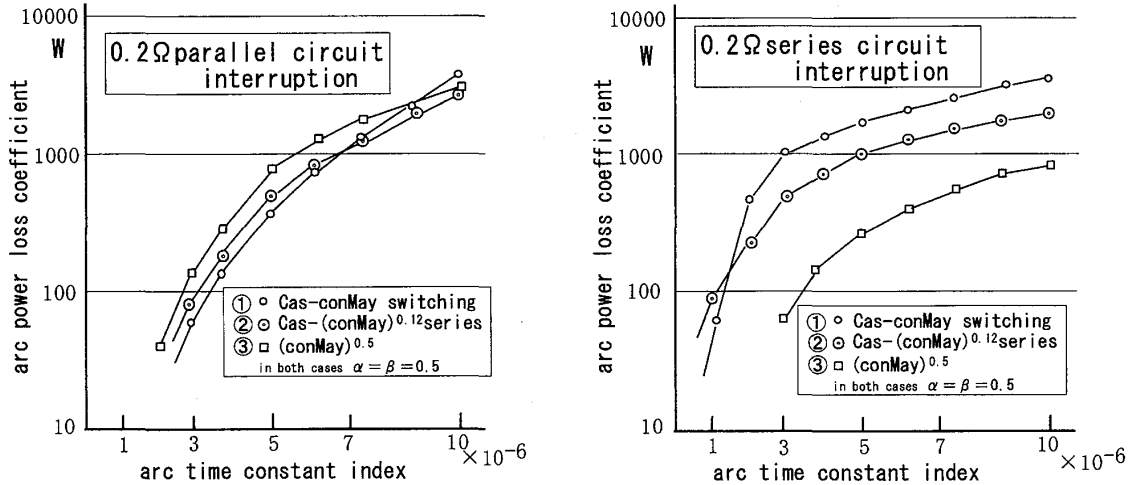


Fig.11 Interrupting limit curve simulated using modified Mayr model

並列回路遮断では①、②、③ のモデル共比較的近い遮断限界を示す。

直列回路ではアーク時定数が $1 \mu s$ あるいはそれ以下では、遮断限界が大きく低下するが、時定数 $2 \mu s$ 以上では遮断限界の変化が緩やかである。Fig.11 の直列回路遮断では限界損失は全体的に小さくなっているが、これは電流低減効果による損失低下への影響が大きいことを示している。遮断限界は①、②が比較的近く、③は低い結果となっている。

4. 2 低抵抗並列回路における電圧立ち上り時間遅れ

低抵抗並列回路遮断では、電流遮断時電流零点から過渡回復電圧が零から立ち上るまでに時間遅れ (T_d) が存在し、これにより $8kA$ 電流遮断においても低いアーク損失で遮断可能になっている。この T_d は開閉器による実試験においては並列抵抗 0.2Ω で約 $25 \mu s$ が実測されている。2) 遮断点のアーク時定数が小さいほど遅れ時間は大きくなるが、アーク時定数あるいは時定数係数を $1 \mu s$ で計算した各モデル T_d の概略値を Fig.12 に示す。

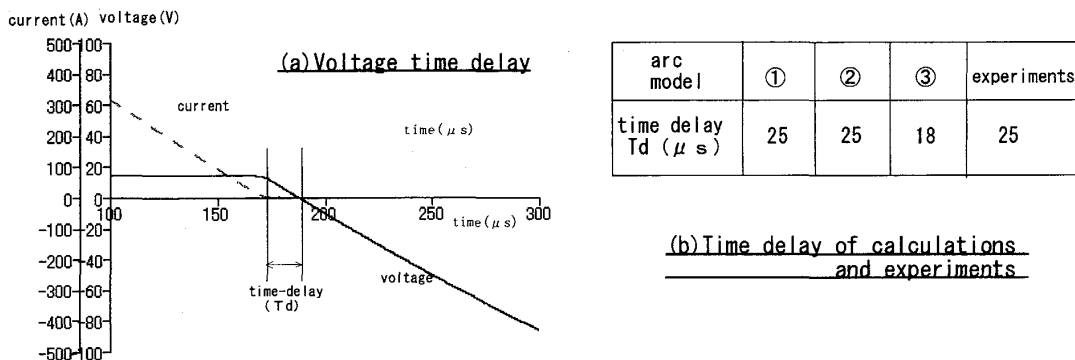


Fig.12 Voltage time delay (T_d) obtained experiments, and calculations using various arc models

Cassie モデルとの切替モデル、あるいは Cassie モデルと直列のモデルによるシミュレー

ションで得られた T_a は実験で得られた T_a とよく一致している。これに対しコンダクタンス依存モデルのみのモデルの T_a は比較的小さい。 T_a はアーク電圧の大きさに影響されるが、コンダクタンス依存モデルではアーク電圧が実測に比べ比較的小さいため T_a が小さくなっていると考えられる。 T_a が小さいにもかかわらず遮断限界損失が小さいのは、アークコンダクタンスや時定数が零点近傍で急激に減少することによる。

4. 3 各種アークモデルと遮断評価

直列回路では並列回路に比べ電流が小さく、電圧上昇率が高い回路となる。アーク時定数が $2\mu\text{s}$ 以上では高い電圧上昇率により、高い限界損失となっている。

並列回路のアーク電圧、電圧立ち上がり遅れ時間遮断現象は Cas-conMay 切替モデルおよび Cas+(conMay) $^\delta$ 直列モデルにおける T_a 値が実測に近いデータとなっていることから、開閉器の電流遮断モデルとして有効であることが分かった。また吹付力を模擬する手段として Cas+(conMay) $^\delta$ モデルにおける δ を 0.3~0.7 レベルで調整することが可能であり、開閉器の条件を反映するのに適していると考えられる。

5. 結言

コンダクタンス依存モデルを使用して、一般開閉器による GIS ループ電流遮断評価、および低抵抗並列付開閉器による GIS ループ電流遮断現象の評価を行った。電流が大きく、電圧上昇率が高いループ電流遮断限界領域では、アーク時定数指数によって遮断限界が大きく影響を受ける。これについては、今後も遮断条件を変えた検討を加える必要がある。並列抵抗付開閉器遮断特性評価において、変形コンダクタンス依存モデルは Cassie モデルと組み合わせて使用すると実測に近い現象が得られた。また並列抵抗付開閉器では、変形 Cas+(conMay) $^\delta$ モデルが開閉器条件により δ を変化できることから有効であることが分かった。

参考文献)

- 1) 岡部成光・財満英一・西脇進他「SF6 ガス遮断器の高周波消弧のシミュレーション」電学論 Vol.111-B No.11 1991
- 2) 佐久間秀一・山本俊一郎・亀井健次他「大容量母線切替用断路器の開発」SPD-90-28
- 3) 吉永淳・白崎達彦・山口貴之・亀井健次・堀之内雄作「GIS 母線ループ電流遮断評価とアークモデル」平成 17 年電気学会全国大会講演論文集 6-207
- 4) 吉永淳「GIS 母線ループ電流遮断と遮断特性評価法」福井工業大学研究紀要第 35 号 2005 年 3 月
- 5) 吉永淳・山田竜也・鳥尾翼・亀井健次・堀之内雄作「低抵抗並列開閉器のループ電流遮断評価」平成 18 年電気学会全国大会講演論文集 6-222
- 6) 吉永淳「ループ電流回路における並列抵抗付開閉器の遮断特性」福井工業大学研究紀要 第 36 号 2006 年 3 月

(平成19年 3月22日受理)