UDC 621.3.025.621.3.014.332:537.52

論文

60-B113

交流電流零点前消弧ピークの発生条件に関する考察

正 員 森 田

公 (富士電機総合研究所)

1. はじめに

交流遮断器の遮断特性に関し、電流零点近傍における熱破壊現象の解析については、従来アークモデル化に際し (a) Mayr 形、(b) Cassie 形を使用することが多い^{(1),(2)}。Mayr 形あるいは Cassie 形のアークモデルにおける電流零点前の電圧波形の代表的特徴の一つは文献(3)に示されているように、

(a) Mayr 形には消弧ピークが存在する

(b) Cassie 形には消弧ピークが存在しないことである。

しかし、従来これらの解析には通常一定のアーク定数を使用していた。近時、アーク空間の温度に依存して係数を変化させる熱方程式も採用されるようになった⁽⁴⁾。

筆者は熱方程式を使用し電流零点におけるアーク温度の諸特性につき解析結果を既に報告した⁽⁵⁾。すなわち、筆者は文献(5)で(1)アークを示す方程式に熱方程式を使用し、(2)遮断すべき回路の電流、回復電圧、過渡回復電圧の周波数などの条件および(3)消弧ガスの種類 (SF_6 , N_2 など) と同時に圧力をも変化させて遮断特性を求めた。この結果判明したことは(1)最大遮断能力を与える電流零点におけるアーク温度は約 5,000~6,000 K であり、(2)規格化したアーク時定数 (後で使用する Θ_a) およびアーク損失 (Φ_a) を導入することにより、最大遮断能力の特性は Mayr 形アークモデルを使用した場合の特性にほぼ一致し、(3)これらの特性はガスの種類、圧力、回路条件などを含んだ形で規格化した表現が可能である、などである。

ここでは、引続き同様の熱方程式を使用することにより電流零点前のアーク電圧消弧ピークの存在条件を消弧媒体の種類 (SF_6 , Air) をも考慮し解析した結果について報告する⁽⁶⁾。

Air については従来 Mayr 形が解析に多く使用されていたが、常には消弧ピークが存在するとはかぎらないことが判明した。一方、 SF_6 ガスアークの場合には消弧ピークの存在が不明確なこともあり、これを説明するために Cassie 形を使用して解析される場合もあった⁽⁷⁾。また遮断条件が苛酷になると従来、経験的に電流零点前のアーク電圧波形は Cassie 形となり、遮断条件が容易になると Mayr 形になるといわれていたが⁽⁷⁾、今回の解析の結果、Air については遮断条件がある範囲の場合のみ消弧ピークが発生し、 SF_6 ガスについては、遮断条件が容易になると消弧ピークが発生することが判明した。

2. Mayr, Cassie 形アークモデル

Mayr 形アークモデルは、既に多くの文献で検討されており次式で表現される。

$$\frac{1}{R_a} \frac{dR_a}{dT} = \frac{1}{\tau_m} \left(1 - \frac{I_a \cdot E_a}{N_m} \right) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 R_a : アーク抵抗 (Ω)、 T : 時間 (s)、 E_a アーク電圧 (V)、 I_a : アーク電流 (A)、 τ_m : アーク時定数 (s)、 N_m : アーク損失 (W) である。

いま電流が直線的に変化すると仮定し次のようにする。

$$I_a = I_0 - I' \cdot T \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 I_0 : I_a の初期値 (A)、 I' : 電流傾斜 (A/s) である。(1)式によって計算されるアーク電圧波形の例を図1の実線で示す。Mayr 形アークモデルの特徴の一つは電流零点前でアーク電圧 (絶対値) が一度大きくなり、その後零値に向かうことである。アーク電

Analyzed Results on Arc Extinction Peak Before AC Current Zero. By Tadashi Morita, Member (Fuji Electric, Corporate R & D)

森田 公: 正員, (株)富士電機総合研究所超高压電力研究所

図1 Mayr形およびCassie形アークモデルにおけるアーク電圧波形の比較

Fig. 1. Comparison of arc voltages between Mayr's and Cassie's arc models.

圧は見易くするために、極性を逆転して示している。

一方、Cassie形アークモデルは

$$\frac{1}{R_a} \frac{dR_a}{dT} = \frac{1}{\tau_c} \{ (E_a/E_0)^2 - 1 \} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 τ_c : アーク時定数 (s), E_0 : 初期アーク電圧 (V) である。(2)式で表わされる電流に対するアーク電圧波形の計算例を図1の一点鎖線で示す。アーク電圧は電流零点前では常に小さくなる傾向を示している。この場合にはアーク電圧波形には消弧ピークは存在しない。従来、この両者のアークモデルの適用については、例えば、実測されたアーク電圧波形に消弧ピークが発生していたり、あるいは電流の遮断に成功の場合の解析にはMayr形アークモデルを使用し、一方アーク電圧に消弧ピークが存在しない場合あるいは、遮断失敗現象の解析などには消弧ピークが存在せず、また必ず遮断失敗となるCassie形アークモデルも適宜使用されていた⁽⁷⁾。

更に、電流零点前にはCassie形、電流零点後にはMayr形を接続する方法も提案された⁽³⁾。

一方、熱方程式においては、アーク空間の温度変化による消弧ガスの輸送係数の値の変化も考慮しているので、いわゆるCassieからMayrの移行は自動的であるとして、例えばアークの中心温度が6,000Kを境として、6,000K以上はCassie形、6,000K以下はMayr形であると区別している例もある⁽⁴⁾。しかし、いずれにしてもアーク電圧の消弧ピークの発生条件に付いては何も検討されたことがない。今回の解析の結果、消弧ピークの発生については、電流が遮断されるべき回路条件と消弧ガスの特性に関係していることが判明した。

図2 計算回路

Fig. 2. Calculated circuit.

3. 熱方程式による計算式

アークの特性を示す式として熱方程式を使用し、回

路の特性をも結合した形でアーク電圧波形を計算した。計算回路を図2に示す。図2で、 E_g は電源電圧 (V), I_g は電源の短絡電流 (A), I_l は故障点電流 (A), L_g は電源インダクタンス (H), C_g は電源キャパシタンス (F), R_g は抵抗 (Ω), CBは遮断器である。アークはCBの部分に存在する。回路条件としては簡単のために端子短絡故障 (線路無視) とし、主として過渡回復電圧 (以下TRVと略す) の振幅率 (以下 r と略す) $= 2 (R_g = 0)$ としたが、一部は $r = 1.4 (R_g \neq 0)$ とし計算した。アークの式として熱方程式を使用し、回路の特性と結合し規格化すると⁽⁶⁾

$$\frac{1}{\Phi_t} \frac{d\Phi_t}{dt} = \frac{1}{\Theta_t} \left(\frac{e_a \cdot i_a}{\Phi_t} - 1 \right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、

$$\Phi_t = \frac{\omega_0}{\omega} \cdot \frac{N_t}{\hat{E}_g \cdot \hat{I}_g} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$t = \omega_0 \cdot T \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\Theta_t = \omega_0 \cdot \tau_t \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$e_a = E_a / \hat{E}_g \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$i_a = \frac{\omega_0}{\omega} \cdot \frac{I_a}{\hat{I}_g} \quad \dots\dots\dots (9)$$

また、 $\omega_0 = 1/\sqrt{L_g C_g}$ (Rad/s), $\omega = 2\pi f$, f = 商用周波数 (Hz), N_t はアーク損失 (W), $\hat{E}_g$ は電源電圧波高値 (V), $\hat{I}_g$ は電源短絡電流の波高値 (A), τ_t は熱時定数 (s) である。(4)式においては、アーク空間の導電率と Φ_t との関係の近似方法により、Mayr形あるいはCassie形に変形可能である⁽⁴⁾。しかし、(4)式の場合は、空間の温度は連続的に変化するため、先に述べたように、例えばアーク温度が6,000°K以上ではCassie形、以下ではMayr形として区別している

例もある⁽⁴⁾。 N_i および τ_i についてはアーク温度の半径方向の分布の様相により異なった表現となり⁽⁵⁾、アークの半径方向の温度分布を Swanson⁽⁴⁾、Frind⁽⁸⁾ 氏らのように Bessel 関数で表現すると次のようになる。

$$N_i = 2\pi S_0(1+\beta)J_1(\delta_1)l_a \dots\dots\dots (10)$$

$$\tau_i = \frac{r_{a0}^2}{\alpha(1+\beta)\delta_1^2} \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 r_{a0} はアークが導電率を失うアークの半径 (m)、 $\alpha = k/\rho C_p$ で温度伝達率 (m^2/s)、 k は熱伝導率 (W/m/Deg)、 ρ は密度 (kg/m^3)、 C_p は定圧比熱 (J/kg/Deg)、 β は乱流係数、 $\delta_1 = 2.4$ 、 $S_0 = \int k dT_a$ で熱流ポテンシャル (W/m)、 T_a はアーク温度 (K)、 J_1 は一次 Bessel 関数、 l_a はアーク長 (m) である。ここで、 α 、 S_0 は温度と同時に消弧ガスの種類にも依存することになるが消弧ガスの k 、 ρ 、 C_p の温度依存性を先に求めておくことにより計算することができる。(4)式はアークの特性の一般化した表現であるが、図2の回路の式と連立して解析した。

4. 解析結果

解析に際しては、規格化された一般的表現での結果を得るために、電流傾斜、TRV 波高値、TRV の周波数などの回路条件を大幅に変化させた。アーク温度については、同一回路条件でも遮断能力の差異 (例えば、アークを消弧する部分の形状などの差異) などに依存することも考えられ⁽⁹⁾、計算の初期条件として任意に与えて変化した。

初期条件としては、文献(4)、(9)などのように、 $de_a/dt=0$ および図2の R_p - C_p 回路に流れる電流は無視できるものとして、先に与えたアーク温度と回路条件より、(4)式の ϕ_i 、 θ_i を求めた⁽⁴⁾、⁽⁵⁾。 t 時間後の ϕ_i 、 θ_i のアーク温度依存性については、温度の関数として、 100°K ピッチで与えられている量 (S_0 、 α 、 k 、 ρ 、 C_p) より Lagrange の補間法により求めた。アークの形状としては、 $l_a=10\text{ cm}$ 、 $r_{a0}=0.05\text{ cm}$ 、 $\beta=10$ とし、一定とした。 l_a 、 r_{a0} 、 β の変化による規格化した(4)式の電流零点におけるアーク温度への影響については文献(5)に報告した。消弧ガスは SF_6 、Air とし圧力は各1、16気圧とした⁽¹⁰⁾。

図3に Air、1気圧の場合の計算波形例を示す。実線は消弧ピークの発生する場合を示し、点線および一〇一〇で示す線は消弧ピークの発生しない場合を示す。 T_a はアーク温度、 e_a はアーク電圧で(8)式により規格化されている。(図4の電圧 e_a 、電流 i_a も規格

図3 Air の場合の計算波形例

Fig. 3. An example of calculated wave forms for Air.

図4 SF_6 の場合の計算波形例

Fig. 4. An example of calculated wave forms for SF_6 .

化されている。) 実線および一〇一〇の場合は消弧ピーク以降においては両者はほぼ同じように変化している。図4に SF_6 、16気圧の場合の計算波形例を示す。実線は消弧ピークの発生する場合を示し、点線は消弧ピークの発生しない場合を示す。それぞれ回路条件は同じで、計算開始時のアーク温度を変化させて計算した結果である。

図3で消弧ピークが発生するのはアーク温度が実線で示す中間の値の場合である。温度が高い場合(点線)も低い場合(一点鎖線)も消弧ピークは発生していない。一方、 SF_6 の場合には温度の高い場合(一点鎖線)には消弧ピークは発生せず、低い場合(実線)に消弧ピークが発生している。これらの理由については後述する。

筆者は文献(5)に示した、電流零点における規格化

図 5 消弧ピーク発生に対する計算結果
(Air, 1気圧)

Fig. 5. Calculated result of generation of arc extinction peak. (Air, 1ata)

図 6 消弧ピーク発生に対する計算結果
(Air, 16気圧)

Fig. 6. Calculated result of generation of arc extinction peak. (Air, 16ata)

図 7 消弧ピーク発生に対する計算結果
(SF₆, 1気圧)

Fig. 7. Calculated result of generation of arc extinction peak. (SF₆, 1ata)

図 8 消弧ピーク発生に対する計算結果
(SF₆, 16気圧)

Fig. 8. Calculated result of generation of arc extinction peak. (SF₆, 16ata)

されたアーク損失 ϕ_t とアーク時定数 θ_d を使用して消弧ピークの発生条件を検討した。以下の計算に際しての回路条件は、TRV の振幅率=2.0 ($R_e=0$)、電源周波数=50 Hz、電源電圧=5~200 kV、遮断電流=5~200 kA、TRV の周波数=5~200 kHz とした⁽⁵⁾。

図 5 に Air, 1 気圧, 図 6 に Air, 16 気圧, 図 7 に SF₆, 1 気圧, 図 8 に SF₆, 16 気圧の結果を示す。図 5~図 8 で○印は消弧ピークの発生する場合、●印は消弧ピークの発生しない場合を示す。また、○、●印の部分の数字は電流零点におけるアーク温度($\times 1,000$ K)を示す。 θ_d - ϕ_t でまとめると次のようなことが判明する。Air については 1 気圧 (図 5) の場合 5,400~6,500 K, 16 気圧 (図 6) の場合 6,800~7,500 K で消弧ピークが発生している。逆にこの温度より高くてもまた低くても発生していない。これらより Air の場合に消弧ピークの発生する電流零点でのアーク温度は約 5,000~8,000 K と考えられる。一方、SF₆

の場合は図 7 および図 8 の結果から約 6,000 K 以下で消弧ピークが発生している。

先に述べたように、 E_a , I_a , ω_0 を広い範囲にわたって変化して求めた結果であるが、筆者の電流零点におけるアーク温度についての文献⁽⁵⁾の結果も同様であるが、アークを示す(4)式が規格化されているため、これら回路条件への依存性は規格化されて表現されている。TRV の振幅率 ≈ 2.0 (図 2 での $R_e=0$) の場合については図 9 で説明する。

図 9 には、電流零点前において消弧ピークが発生する場合にアーク電圧 E_a の絶対値が増加を開始する時点のアーク温度を○印で示す。Air の場合は 13,500~8,000 K であり、SF₆ の場合には 9,500~7,000 K である。

また、SF₆, 16 ata の場合には、TRV の振幅率の影響を検討するために、 $r=1.4$ として計算した結果を示す。電源電圧=17.3~225 kV、遮断電流=30~63

振幅率	ガスと圧力	アーク温度 ×1000 °K
2	Air 1 気圧	6 10 14
	Air 16 気圧	6 10 14
	SF ₆ 1 気圧	6 10 14
	SF ₆ 16 気圧	6 10 14
1.4	SF ₆ 16 気圧	6 10 14

図 9 電流零点前においてアーク電圧が増加を開始するアーク温度

Fig. 9. Arc temperature at beginning of increase in arc voltage before current zero.

kA, TRV の周波数=1.12~112 kHz の結果であるが、 $r=2.0$ の場合と同様に約 9,500°K 以下で消弧ピークが発生している。 (R_e) の影響のないことについては、〈5・2〉節で述べる)

5. 考 察

解析結果より判明した事項について以下考察する。

〈5・1〉消弧ピークの発生温度について 図 9 に示すように消弧ピークが発生するアーク温度にある範囲が存在することが判明した。アーク電圧に消弧ピークが発生するためには電流の変化が(2)式で示すようにほぼ直線的に減衰していることを考えると、アーク抵抗が電流の減衰以上に増加する必要がある。

(4)式の () 内の第 1 項を考えると更に Φ_i の変化に対して、抵抗の変化が大きい場合に発生することになる。これは Mayr 形アークモデルで考える場合、アーク損失が一定であるため、電流が減少すると、ある時点ではアーク電圧は上昇することになる。熱方程式では電流の零点に向かってアーク温度が低下しているため、 Φ_i は減少方向にある。このために電流が減少する場合に消弧ピークが発生するためには、 Φ_i を与える S_0 の減少具合とアーク抵抗の増加割合あるいはアークコンダクタンスの減少具合に依存することになる。このため図 10 には Air および SF₆ の各 1, 16 気圧に対して、各コンダクタンスの熱流ポテンシャル S_0 に対する特性を示す。実線は Air, 1 気圧、一〇一は Air, 16 気圧、点線は SF₆, 1 気圧、一点鎖線は SF₆, 16 気圧の特性を示す。

Air, 1 気圧については 12,000 K 位からコンダクタンスが急激に低下を始めるが 7,000 K 付近でコンダクタンスの低下具合がやや緩くなっている。このため 12,000~8,000 K で消弧ピークの発生する可能性がある。Air, 16 気圧の場合は同様に 13,000~8,000 K で

図 10 導電率と熱流ポテンシャル

Fig. 10. Electrical conductivity as a function of heat flux potential.

発生する。一方、SF₆, 1 気圧については 8,000 K 以下でコンダクタンスが急激に低下しているため、この温度以下で発生することになる。SF₆, 16 気圧の場合には 10,000 K で発生することになる。

Air の場合に 7,000 K 付近で特性が再度緩やかになっているのは解離のために熱伝導度が大きくなるためである。一方、SF₆ では解離のために熱伝導度が大きくなる温度は約 2,000 K 付近であり、既にコンダクタンスは非常に小さくなっているため、消弧ピークの発生条件にはなにも影響を与えない。Air と SF₆ の大きな差異は電流零点前のアーク温度について考えると Air の場合には高くても低くても消弧ピークが発生しないことである。図 3 に示すようにアーク温度が中域の場合のみ消弧ピークが発生している。

〈5・2〉TRV の振幅率の影響について 図 9 に示したように、TRV の振幅率を調整する抵抗 (R_e) は電流零点前の消弧ピークの発生する温度にほとんど影響を与えない。これは次のように説明される。

図 2 に示すように、TRV 調整用の R_e はキャパシタンス C_e と直列に接続されている。電流零点前の領域においてはアーク電圧の時間的変化は比較的小さく、直流的になっているので (図 9 は $de_a/dt=0$ となった時点のアーク温度となっている) C_e - R_e 直列回路のインピーダンスはほとんど C_e により決まり、 R_e が挿入されても、この領域では実質的に消弧ピークの発生するアーク温度特性に影響を与えることは少ないためである。当然のことであるが、TRV の時間的変化が大きい領域 (例えば、電流零点後の領域) では

図 11 器壁安定化アークにおける実測例 (Air)

Fig. 11. A measured example at wall stabilized air arc.

R_p - C_p 直列回路のインピーダンスを計算する場合に、 R_p が無視できるとは限らない。

〈5.3〉 消弧ピークと電流遮断の成否 次に消弧ピークの存在と電流遮断の成否について解析結果を述べる。

消弧ピークの存在と電流遮断の可否の関係は必ずしも一意的ではなかった。これは消弧ピークの発生する領域は電流零点前であり、一方遮断の成否が最終的に決定されるのはアーク電圧に比し比較的大きな TRV が印加される電流零点後の領域である。すなわち、電流零点前では大きな電流と低いアーク電圧であるが、電流零点後は小さな残留電流と高い TRV の関係であり、このため極端な表現をすると、電流零点前は電流零点後に印加される TRV に耐えるかどうかの初期値を与えるものであり、必ずしも遮断の成否を一意的に決定する領域ではないことによる。

〈5.4〉 実測例

(1) Air の場合 電流零点近傍について詳細に測定された例は少ないが文献(11)について検討する。器壁安定化アークであるが直径=5 mm でアーク電流波高値 220 A と 54 A の例である。図 11 に波形を示す。実線が 220 A の場合であり、点線が 54 A の場合である。この場合の電流零点前のアーク電圧波形を比較して見ると、54 A の場合は遮断条件としては 220 A と比較して遮断容易であり、アーク温度は低下しているにもかかわらず余り明確な消弧ピークは発生していない。逆に、220 A の方はアーク温度は高いにもかかわらず明確な消弧ピークが発生している。55 A の波高値付近でのアーク温度は図示していないが文献

(8)によると 14,000 K であることを考えると零点前 0.1~0.2 ms においてはアーク温度は相当低下し、温度が低下することにより、消弧ピークの発生しない方向に近づいているものと考えられる。文献(12)の結果では消弧ピークの存在と遮断の成否は関係ない結果となっている。

(2) SF_6 の場合 SF_6 の場合アーク温度と消弧ピークの存在が検討できるようなデータはない。文献(13)によるとオシログラムでは消弧ピークが存在しているが、遮断の成否とは関係ない。一方、文献(14)ではオシロ例では何れも消弧ピークは存在していない。直接温度の測定はないが、山形氏ら⁽⁹⁾の検討では電流零点におけるアーク温度は約 6,000 K であり、零点より数 μs 前では約 10,000 K であり、消弧ピークは発生しない結果になったと推測される。この場合も遮断の成否とは関係がない。

6. む す び

電流零点前のアーク電圧の消弧ピークの発生条件について、消弧ガスの特性を考慮した熱方程式により検討した結果次のことが判明した。

(1) アークの特性および回路の特性を含んで規格化したアーク定数を使用することにより、消弧ピークが発生する領域と発生しない領域とに分離される。Air の場合は消弧ピークの発生する電流零点でのアーク温度は約 5,000~8,000 K である。 SF_6 の場合には約 6,000 K 以下になると消弧ピークが発生する。

(2) アーク電圧が増加を始める時点でのアーク温度では Air の場合 13,000~8,000 K と範囲があり、 SF_6 の場合には約 10,000 K 以下である。

(3) これらの特性は導電率の熱流ポテンシャルへの依存性により説明できる。導電率が熱流ポテンシャルに対して大きく変わる領域で消弧ピークが発生することが判明した。

(4) 実測結果との照合からもこれらのことは確認された。

(5) これらの解析結果はアークを示す式を規格化することにより、回路条件をも規格化して、無関係であることが判明した。

最後に、本論文のまとめに対して種々ご検討頂いた名古屋大学名誉教授、現在、愛知工業大学教授 宮地 肇先生、また Air, SF_6 などのデータを頂き実測結果の採用に際し多くの助言を頂いた名古屋大学教授 鬼頭幸生先生に感謝します。

(昭和59年11月26日受付、同60年4月9日再受付)

文 献

-
- (1) O. Mayr: *Archiv. f. Elektrotec.* **37**, 588-608 (1943)
 - (2) A. M. Cassie: *CIGRE* Nr. 102 (1939)
 - (3) T. E. Browne, Jr: *Trans. Amer. Instn. Elec. Engr.* **67**, 141 (1948)
 - (4) B. W. Swanson, et al.: *ETZ-A*, **93**, 10, 375 (1972)
 - (5) 森田: 「交流電流遮断時の電流零点におけるアーク温度」電学論B, **105**, 3, 103 (1985)
 - (6) 森田: 昭 59 電気学会東海支部大 No. 73
 - (7) L. S. Frost, et al: *IEEE Summer Meeting*, F 77, 627-3 (1977)
 - (8) G. Frind: *Z. Angew Phys.* **12**, 231 (1960)
 - (9) 山形, 他: 電学論B, **100**, 577 (昭 55)
 - (10) Y. Kito, et al.: *Transport & Thermodynamic Properties* 名大 56-3
 - (11) 松村: 「アーク時定数から見た過渡空気アークの研究」名大学位論文 (昭 56-3)
 - (12) 等々力: 電気試験所研究報告, 第 651 号 (1964)
 - (13) 宮本, 他: 電学論, **919**, 115 (昭 40)
 - (14) 西川, 他: 電学論B, **98**, 57 (昭 53-4)
-