

1109 直流遮断器におけるアーク形状と作用する電磁力について

Electromagnetic force acting on the arc in HSCB and its dependence on the shape of the arc

正 [電] ○林屋 均 (JR 東日本)

正 [電] 中島 等 (JR 東日本)

正 [電] 尋田 伸幸 (JR 東日本)

正 [電] 安藤 政人 (JR 東日本)

正 [電] 根岸 英雄 (JR 東日本)

Hitoshi HAYASHIYA, R&D center of JR East Group, 2-0 Nisshin, Saitama-shi, Saitama

Masato ANDO, R&D center of JR East Group

Hitoshi NAKAJIMA, R&D center of JR East Group

Hideo NEGISHI, R&D center of JR East Group

Nobuyuki HIROTA, R&D center of JR East Group

In our previous study, the electromagnetic force acting on the arc of high speed circuit breaker (HSCB) was investigated by finite element analysis. As the arc composes the loop circuit, the electromagnetic force to expand the major radius of the arc acts on the arc. It was shown that the current distribution in the arc influences the value of electromagnetic force strongly. In this paper, the dependence of the minor radius of the arc on the electromagnetic force is calculated in detail. The expanding force of the arc with 1mm radius is about 1.5 times larger than that of the arc with 10mm radius.

Key Word : arc, FEM, HSCB, electromagnetic force

1. はじめに

直流高速度気中遮断器(High Speed Circuit Breaker, 以下 HSCB)は、電鉄用変電所のき電線送出し箇所設備され、き電系統保護の要として古くから用いられている。

JR 東日本では、列車運行密度が高まるにつれ、変電所における瞬時の負荷電流は益々増加し、定格 3,000A で 12kA まで遮断目盛を持つ HSCB も開発・実践投入され、今後もその責務はより一層厳しくなるとされる⁽¹⁾。最近では、メンテナンスが容易でありより高速での電流遮断が実現できる GTO 遮断器⁽²⁾や真空遮断器⁽³⁾も開発され、一部民鉄や JR 東海などの実設備で導入されているが、古くからの HSCB も、依然として導入されて続けている。

筆者らは、大型目盛を持つ HSCB の開発を通じ、アークを速やかに引き伸ばすことが直流遮断器動作上の生命線であることを痛感したが、これらの根源となるアークを引き伸ばす電磁力がどの程度であるかということについて明示した資料に乏しかったため、工学的な興味から、有限要素法を用いた電磁界解析を行い、その概算値を把握した⁽⁴⁾。その結果、積極的なアーク吹き消し機構である一次吹き消し機構や二次吹き消し機構などにより強い電磁力がアークに作用されると同様に、アークが閉ループを構成することに起因した自律的な電磁力が、アークを拡大する上で大きな電磁力となり得ている可能性を示す結果を得た。特に興味深かったのは、アークを構成する電流の分布が、電磁力の大きさに少なからず影響を与えるという結果である。電流分布により電磁応力が変化することは理論的にも当然のことであるが、ちょっとした電流分布の違いが電磁力としては 10%程度もの差違をもたらすということは予想外であった。文献⁽⁴⁾では、アークに作用する電磁力をアークの極率半径やアーク電流分布などをパラメータとして計算を行い、積極的なアーク吹き消し機構との比較を行ったが、本論文では、特にアークに作用する自律的

な電磁力について、その電流分布の違い(アークの太さ)のみに絞って検討した。

2. 解析モデル

電磁界解析には三次元有限要素法を用い、線形静磁界問題として取り扱い、ある仮定された電流経路に作用する電磁力として、計算を行った。解析では、図 1 に示したように大半径 100mm の円弧状アークの $\pi/6$ ラジアン分をモデル化し、式 (1)を用いてローレンツ力としてアークに作用する電磁力を算出した。

$$\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B} \dots \dots \dots (1)$$

なお、式(1)により求めた電磁力と、磁束密度のみを用いてマクスウェルの応力から求めた電磁力の値は良く整合することが確認されている⁽⁴⁾。

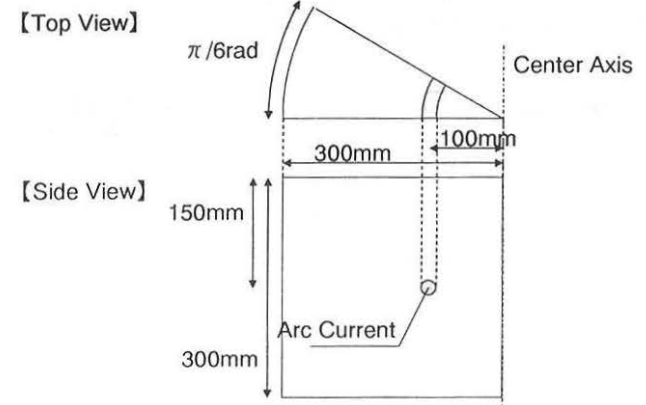


Fig.1 Analytical Model for FEM Analysis

図 1 では、アーク電流経路として直径 20mm の導体を仮定

しているが、これを厚さ 1mm の円殻環に 10 分割し、それぞれの導体に別々に電流密度を与えて、電流分布の違いを表現した。ここでは、全電流値は 20kA として電流の直径を 2mm ～20mm とし、電流密度が一樣となるように各導体の電流値を設定した。10 通りの解析条件を表 1 にまとめる。

Table 1 Analytical Condition

Case #	Diameter	Current Density	Case #	Diameter	Current Density
Case1	2	6369A/mm ²	Case6	12	177A/mm ²
Case2	4	1592A/mm ²	Case7	14	130A/mm ²
Case3	6	708 A/mm ²	Case8	16	100A/mm ²
Case4	8	398 A/mm ²	Case9	18	79 A/mm ²
Case5	10	255 A/mm ²	Case10	20	64 A/mm ²

3. 解析結果

アーク直径が 4mm, 10mm, 16mm の場合のアーク近傍の磁束密度の様子を図 2 に示す。等高線間隔は 0.2T である。アークの総電流値は 20kA で統一してあるが、アーク直径が異なるためにアーク部分の電流密度が異なり、このため、アーク内部の磁束密度の様子が大きく異なっている。

Case1～10 について、ローレンツ力により求めた円弧電流に作用する電磁力を図 3 に示す。縦軸は長さ 1mm あたりのアーク電流全体に作用する電磁力を示している。ここで、アーク円弧の大半径は 100mm であるため、例えば 90 度分のアーク円弧を考えれば、全体としては 156mm のアークに 1mm あたり図 3 に示した電磁力が作用する。アーク半径が小さくなるにつれ、即ち、アークの太さが細くなるにつれてアークを拡大しようとする方向に作用する電磁力が大きくなることは当然予想されることであるが、1mm～10mm 程度の半径の違いにおいても、その値は 1.5 倍以上も異なってくる計算結果となっている。

4. まとめ

HSCB において、その動作上重要な役割を演じるアーク吹き消し動作に関連して、アーク自身が閉ループを構成し、これにより自律的に拡張しようとする電磁力がどの程度であるかを有限要素解析により静磁界解析を行うことで算定した。これまでの検討から(文献(4))、HSCB に装備された積極的なアーク吹き消し機構同様に、自律的な電磁力が大きな役割を演じている可能性は示唆されていたが、その大きさは、アーク

電流の直径により大きく影響を受けると思われる結果を得た。しかし、アークシュート内部でのアーク挙動については明快に計測した実例が見当たらないため、はっきりとしたことはいえないが、1.5～2.0N/mm 程度であると思われる。なお、アークシュートで内部では、アークシュート内壁とアークの接触や、アーク接点下方からのエアの吹き付けなどによりアークから熱を奪いアーク抵抗を高める工夫がされているが、これによればアークは収縮してアーク半径は小さくなると想像され、アークを拡張して引き伸ばす電磁力はさらに大きくなる方向で作用し、限流遮断にポジティブに寄与することになる。

参考文献

- (1) 林屋 他 「短絡試験装置を用いた直流大電流遮断試験」、平成 15 年電気学会全国大会, No.5-233, 2003
- (2) 吉舖, 「GTO 遮断器」, 鉄道と電気技術, pp.27-30, Vol.2, No.3, 1991
- (3) 長谷, 野尻, 菅野, 昆野, 岩井, 「真空遮断器を利用した直流限流遮断器」, 電気学会静止器研究会資料, SA-01-51, pp.35-40, 2001
- (4) 林屋 他 「直流高速度遮断器のアークに作用する電磁力の概算」, 電気学会交通・電気鉄道研究会, TER-03-58, pp.37-42, 2003

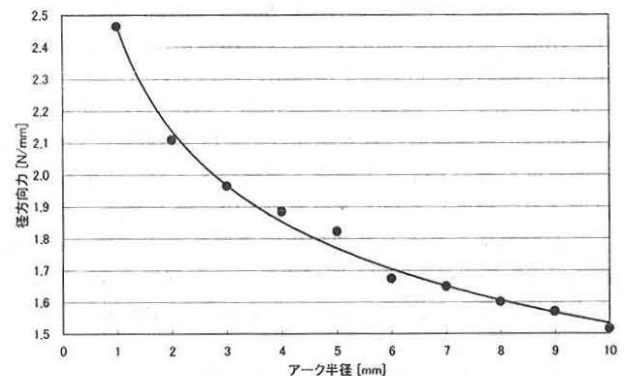


Fig.3 Relation between the arc radius and electromagnetic force

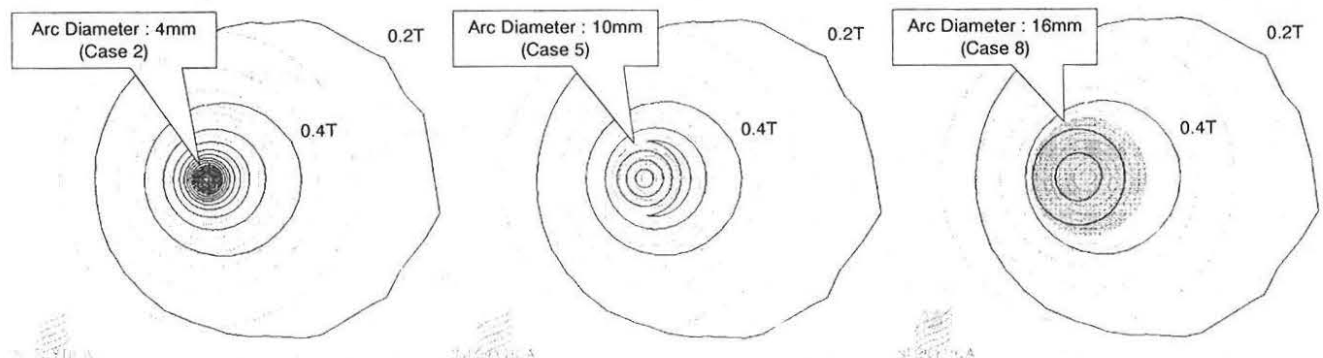


Fig.2 Magnetic flux density distributions around the arc