ナトリウム(Na)限流素子の自己復旧特性と 低圧配電回路応用における過電流協調

正員 和田 勇一 (三菱電機)

正員 浜野 末信 (三菱電機)

正員 森 貞次郎 (三菱電機)

Self-rehealing Characteristics of a Sodium Current Limiter and its Over Current Coordination
for Low Voltage Distribution Systems

Yuuichi Wada, Member, Suenobu Hamano, Member, Teijirou Mori, Member
(Mitsubishi Electric Corporation)

A sodium current limiter, which has been developed and applied for low voltage use, is not a current limiting fuse but a new type of reusable current limiting device which utilizes metallic sodium as a fusible element. The excellent current limiting performance and the quick self-rehealing properties of the sodium limiter allowed highly reliable electric power systems to be obtained economically and compactly.

In this paper we experimentally examine the rehealing properties of the sodium limiter after current limiting operation and discuss the over current coordination of the sodium limiter for a low voltage distribution system. The results are summarized below.

(1) The resistance of the sodium limiter, being between about one thousand and several thousand times its normal resistance r_0 at room temperature during a current limiting operation of short circuit fault currents, changes abruptly to 30 to 40 times its r_0 value just after the disappearance of the fault current and falls steadily to r_0 .

(2) The sodium limiter can recover current carrying capability for a over load current even immediately after a current limiting operation and maintain its capability for the following normal load current. The upper limit of the recovery of the sodium limiter is given by its over current against the time characteristics under the normal condition.

(3) The self-rehealing characteristics of the sodium limiter presented here give the ability to design a low voltage motor control center using the sodium limiter which maintains maximum service continuity up to high fault currents.

キーワード：遮断器，ヒューズ，限流装置，自己復旧型限流素子，ナトリウム限流素子

1. まえがき

電力回路における短絡保護方式の一つとして，限流遮断と呼ばれる方式がある。これは回路に短絡事故が発生して短絡電流が流れ始めたとき，なんらかの方法によってこの電流を波高値に達する前にある一定値以下に制限し遮断する方式である。短絡事故における機器の熱的あるいは電磁力による機械的な苛酷度は短絡電流瞬時値の2乗に比例するので，限流遮断は機器の損傷あるいは耐量の低減が可能になるという点で非常に好ましい保護方式である。

限流遮断を行なう機能素子としてもっともよく知られているものとして限流ヒューズがある。しかし限流ヒューズは，限流遮断動作でエレメントが熔断すると再び電流を流すことができないため，限流遮断動作後正常な状態に復旧させるためには取り替えなければならないという欠点をもっている。この欠点をなくし，かつ限流機能を有する新しい素子としてアルカリ金属のナトリウム(Na)をエレメントにもつ自己復旧型の限流素子が開発され，優れた限流機能と異常大電流除去後の高速再通電機能の二つの特徴を併せ持つものとして実用化されている[1][2]。

本論文では、ナトリウムを用いた自己復旧型の限流素子（以下 Na 限流素子と称する）について、特徴ある機能である限流動作後の自己復旧特性と再通電特性を実験的に明らかにするとともに、この二つの機能を最大限に生かした応用例としてコントロールセンタの主回路限流装置に適用する場合に、Na 限流素子の再通電性能と適用負荷の許容再通電容量に関する過電流領域の協調について検討を行った[3]。

2. Na 限流素子とその適用

< 2. 1 > Na 限流素子の構造と動作 図1は自己復旧型 Na 限流素子の構造断面図で、本実験のために中間電極と信号端子を設けている他は製品と同じである。基本的には2つの電流端子とこれを接続する金属ナトリウム (Na) の電路、ならびにピストンと高圧封入された不活性ガスからなる加圧機構とから構成されている。Na の電路は高い熱伝導率をもつ磁器円筒によって囲まれており、さらに磁器円筒には特殊絶縁物を介して金属外筒によるやきばめが施され高い内圧に耐えるようになっている。加圧機構は Na に圧力を加え素子が常時導通を保つようにするとともに、限流動作時に発生する内部の圧力上昇を和らげる緩衝機構の役目もしている。Na は定常電流通電中はチーズ状のやわらかい固体または液体の状態で低抵抗であるが、短絡電流のような大電流が流れるとジュール発熱により急速に加熱されて気化し高温高圧力のプラズマ状態となり高抵抗となる。このため短絡電流は一定値以下に抑制すなわち限流される。加圧機構と反対側の Na 電路の一部にノッチと呼ぶ断面縮小部を設けており、限流動作の際 Na の気化がノッチ部から開始し磁器円筒内の電路すべてにわたって生ずるようにしている。限流された電流が他の直列スイッチで除去されると、Na は周囲の磁器円筒への効果的な放熱とピストンによる圧縮力を受けてすみやかに液化または固化し、低抵抗状態となって再通電の機能を回復する。

< 2. 2 > 適用回路 図2は Na 限流素子を電動機の開閉制御を行う低圧コントロールセンタの主回路に適用する場合の単線回路図である。主回路部分は Na 限流素子 (NCL) と2～3サイクルの遅延開極動作 (Short Time Delay: STD) 要素をもつ主回路配線用遮断器 (NFM) とが直列に接続された構成となっており、主回路につづく分岐回路部分は分岐回路配線用遮断器 (NF1等) や電磁開閉器 (MS1等) などの開閉制御機器を経て電動機負荷 (L1等) へ接続された構成となっている。

つぎにこの回路の動作を述べる。まず分岐回路のA点における短絡事故を考える。短絡電流の大きさが NF1 の遮断容量以下の場合には、NCL は限流動作をしないかあるいはわずかに動作するように設定されていて、NF1 はほぼ独力で短絡電流を遮断する。短絡電流が NF1 の遮断容量を越える場合には、NF1 は NCL の限流動作の助けを受けつつ、自己の遮断容量以下に限流された短絡電流を短

図1. Na 限流素子の構造断面図

Fig.1. Cross section of a sodium limiter.

TR: 変圧器 NCL: Na 限流素子 Rp: 並列抵抗
NFM: 主回路配線用遮断器 (Short Time Delay 付)
NF1 ~ NF_n: 分岐回路配線用遮断器
MS1 ~ MS_n: 電磁開閉器 L1 ~ L_n: 負荷

図2. Na 限流素子を適用したコントロールセンタの回路図

Fig.2. Skelton circuit of a control center utilizing a sodium limiter.

絡発生後約1/2サイクルと非常に高速に遮断する。このような保護を後備保護あるいはカスケードバックアップと呼ぶ。このとき、STD要素があるため NFM は動作せず、NF1により事故の分岐回路 (L1回路) だけが選択的に除去される。したがって他の健全な分岐回路負荷 (L2 ~ Ln) には無停電で電力が供給される。すなわち事故範囲の局所化が行われ、これを選択保護と呼ぶ。つぎに母線のB点における短絡事故を考える。この場合 NCL は、NFM が遮断するまでの2～3サイクルの間、短絡電流を NFM の遮断容量以下に限流して NFM の遮断を助けるとともに、下位のみならず上位の直列機器の損傷をも防ぐことができる。なお同図に示すように、実際の回路では限流動

作時における異常電圧の抑制やNCLの苛酷度の低減のため、NCLに並列に抵抗(R_p)が接続されている。

以上述べたように、NCLにかかる回路構成へ適用した場合には、これまで難しいとされていたカスケード限流遮断と選択限流遮断の両立が最大短絡電流まで成立するので、短絡電流が系統に及ぼす電氣的擾乱の抑制、熱的および電磁機械的苛酷度の低減、ならびに健全な負荷への電力供給信頼性の大幅な向上が可能となる。

3. Na限流素子の復旧特性

<3. 1> 実験試料 本実験に用いたNCLは、電圧が3相460V、電流が800A、限流可能な短絡電流が170kAの定格を有している。素子外形は、長さ287mm、最大外径60mmであり、Na電路の形状は、ノッチ部分が直径3.5mm、長さ7mm、非ノッチ部と呼ぶノッチ部以外の部分が直径6mm、長さ30mmである。また素子の室温(25℃)における端子間抵抗は約0.1mΩであり、短絡時における室温から気化までの I^2t ($=\int i^2 dt$)は約 $1 \times 10^6 A^2 \cdot s$ である。

<3. 2> 実験回路および実験方法 図3は、図2の分岐回路A点における短絡事故を模擬した、単相の実験回路である。図において、NCLは主回路限流装置に適用されたNa限流素子、R_pは並列抵抗、NFは短絡事故分岐回路の配線用遮断器、そしてR_Lは他の健全な分岐回路の負荷抵抗に相当している。NFの定格電流は225A、R_pの抵抗は50mΩである。記号を丸で囲ったものは電圧および電流の測定箇所を示す。ノッチの電圧(V₁)は計算($=V_N - V_2$)により求めた。回路は3.3kV、60Hz、容量2000kVAの3相短絡発電機からなる一次側電源、投入/保護スイッチ、短絡電流調整用のリアクトル、3.3kV/330Vの単相短絡変圧器、および定格電圧600V、断面積400mm²のゴム絶縁電線(往復線路長約6m)により構成されている。実験は変圧器2次側の回路電圧が270V_{rms}(3相460Vの $1/\sqrt{3}$ 相当)になるように短絡発電機の励磁電流を調整して行なった。NCLとNFの部分をゴム絶縁電線で短絡したときの回路の短絡電流は、非対称波高値で60kA、力率は0.125であった。

つぎに実験方法について述べる。スイッチSを閉じることにより、短絡電流はNCLとNFを通じて流れ始める。短絡電流はピークに達する前に、NCLが気化し限流動作を行なうことにより、ある値以下に抑制される。この値はNFの遮断容量以下に設定されているので、NFは約1/2サイクルの遮断時間でこの短絡電流を遮断する。NFが遮断すると、ひきつづき健全負荷群の負荷電流に相当するI_{RL}がNCL、R_pおよびR_Lを通じて流れ続け、あらかじめ設定された時間t_{RL}秒後にスイッチSで遮断される。

実験はI_{RL}とt_{RL}をパラメータに行なった。I_{RL}の大きさはR_Lにより、I_{RL}の通電時間t_{RL}はスイッチSの開極により設定される。実回路でのI_{RL}やt_{RL}は、短絡の継

Ge: 短絡発電機 L: リアクトル S: 投入/保護スイッチ Tr: 変圧器
NCL: Na限流素子 P.E: 信号端子 Rp: 並列抵抗 E: アース
RL: 負荷抵抗 NF: 分岐回路配線用遮断器

図3. 実験回路

Fig.3. Test circuit for the self-rehealing characteristic of the sodium limiter.

表1. 復旧実験での再通電電流I_{RL}とその通電時間t_{RL}

Table 1. Over load current and its duration after the fault in the experiment.

ケース	I _{RL} (Arms)	t _{RL} (s)
①	140	0.3
②	3520	0.3
③	4500	0.3
④	5340	0.3
⑤	6500	0.3

(t_{RL}は短絡開始時点からの時間)

続時間、電動機個々の回転速度の低下ならびに残留起電力の大きさや位相に依存するので、その様相はかなり複雑である。ここではI_{RL}およびt_{RL}は、実測データと電気-機械系計算プログラム「SCAP-M」による計算結果とから決定した[4]。

本実験に用いたI_{RL}およびt_{RL}の組合せを表1に示す。t_{RL}としては、短絡期間が短いため過渡電流の減衰も速く最大0.15s程度を考えておけばよいが、0.15s以降の復旧状況も把握しておくために0.3sに設定した。I_{RL}としては140Aから最大6500Aまでの5ケースとした。ケース①は140Aと極端に小さいが、これは再通電電流がない場合とみなして復旧過程を調べるためである。またケース⑤の6500Aは本実験に供したNCLの定常状態における「電流-限流動作開始時間」の特性、いわゆる「I-t特性」から0.3sまで流し得る最大値として設定した。

<3. 3> 実験結果およびその考察 図4に、ケース①(I_{RL}=140A)およびケース②(I_{RL}=3520A(定常電流の4.4倍相当))の場合の実験のオシログラムを示す。図4においてS、W、XおよびYは、それぞれ短絡開始、NCLの限流動作開始、NFの遮断完了、

図4. 実験のオシログラム

Fig. 4. Typical test oscillograms in the experiment.

およびNCLの限流動作終了の時刻を表す。他の信号と区別しやすくするため、 I_{RL} は逆極性とした。NCLの電圧は、限流動作中は感度を小さくした信号 V_2 、 V_N で、限流動作終了後の復旧過程は感度を高めた V_2' 、 V_N' を用いた。なお、ケース①とケース②では I_{RL} が大きく異なっているため対応する信号の感度を変えているほか、 V_2 と V_N の位置も逆になっているので注意を要する。

まずケース①のオシログラム(a)について考察する。S点で投入/保護スイッチが閉じ、NCLおよびNFを通じて短絡電流が流れ始める。W₁点でNCLが気化(電圧 V_2 、 V_N 等が発生)し抵抗が増大すると、短絡電流は限流され減少しはじめる(I_N 、 I_{NF} 等が減少する)。ここでオシログラム(a)のZに示すように I_{NF} に2.0ms程度の無通電の期間(ゼロポーズ)がある。これはNFの接点が限流される前の大きな短絡電流による電磁反発力で開離し、慣性効果のためそのまま開離しており、NFを流れている電流が小さくなると一旦遮断されることによる。なお I_N にもゼロポーズがあるように見えるが、 I_{RL} が小さいため信号出力が小さいだけである。このときNCLは一旦復旧している。

電流の減少とともに電磁反発力が小さくなり慣性効果も無くなってNFの接点が閉じると、再び短絡電流がNCLとNFを通して流れ始める。NCLはW₂点で再度気化し限流動作を行う。W₂点以降X点までNCLは限流動作と復旧動作を繰り返していることが I_N 、 V_N 等からわかる。

X点でNFは、短絡電流を遮断する。その後NCLと負荷抵抗 R_L にはひきつづき I_{RL} (140A)が流れ続ける。このケースでは I_{RL} が小さいため、NCLはNFの遮断と同時に限流動作を終了し(すなわちY点=X点)、この時点でNaは低抵抗状態に復旧している。以後NCLの電圧 V_2' 、 V_N' は時間の経過と共に減少しており、NCLの

抵抗は I_{RL} を流しつつ低下していることがわかる。さらに興味あることは、 V_N がX点で復旧しているのに対し、 V_2 はX点よりも約1.6ms早く復旧していることである。これは非ノッチ部がノッチ部よりも先に復旧している事を示している。

以上の考察からケース①のように I_{RL} が小さく再通電電流がないものと見なせる場合には、NCLはNFの遮断完了時点より先に非ノッチ部が復旧し、NFの遮断完了と同時にノッチ部も復旧して限流動作を終了し、その後は負荷電流 I_{RL} を流しつつ抵抗が減衰していくことがわかる。

ケース②のオシログラム(b)では、NFはX点で短絡電流を遮断している。しかし、NCLはX点以降も限流動作を継続しておりY点に至って復旧している。すなわちX点からY点の間では I_{RL} は並列抵抗 R_p を通じて流れており、負荷への電力供給は R_p を通じて行われている。Y点以後NCLは I_{RL} を流しつつ抵抗が減衰している。このケースで、非ノッチ部の復旧がノッチ部のそれよりも先行する時間は1.1msであった。 I_{RL} が大きいためケース①と比べ非ノッチ部の復旧が遅くなっている。またこのケースでは、ケース①のゼロポーズのような期間は存在していない。

図5は図4のオシログラムから、短絡開始時点(S点)を起点として、ナトリウム電路のノッチ部(ℓ_1 部)および非ノッチ部(ℓ_2 部)における抵抗率 ρ_{ℓ_1} 、 ρ_{ℓ_2} と常温(25℃)におけるナトリウムの抵抗率 ρ_0 ($4.6 \mu\Omega \cdot \text{cm}$)との比、すなわち抵抗率比 ρ_{ℓ_1}/ρ_0 および ρ_{ℓ_2}/ρ_0 を求めたものを示す。

短絡期間におけるNCLの抵抗は、限流動作の開始直後と終了直前は常温の1万倍を超える大きい値を示し、この限流動作期間中では常温の約千倍から数千倍ときには1万倍以上の間を複雑に変化している。この原因としては、限流の開始直後と終了直前においてはNaは気体状態である

図5. 抵抗率の比からみたNa限流素子の復旧特性

Fig.5. Relative electrical resistivity vs. time characteristics of the sodium limiter after current limiting operation.

が電離度が低く高抵抗になっているのに対し、限流動作期間中においては注入エネルギーが多いため高電離プラズマとなり低抵抗になっているためであると考えられる。しかし両ケースの限流動作期間中における平均的な抵抗には差がなかった。なお、熱力学的に数値計算されているNaの高温気体の抵抗から、限流期間中のNaの温度は数千度から数万度になっているものと推定される。

短絡電流が除去され限流動作が終了するY点で、ノッチ部の抵抗は常温の約30～40倍へ、非ノッチ部の抵抗は約30倍へとほぼ瞬時に低下し、以後時間の経過とともに低下して行く。Y点から100msの時点のノッチ部の抵抗値は非ノッチ部のそれよりもケース①で約15%、ケース②で約13%高かった。またケース①のゼロポーズ期間における素子の抵抗は、ノッチ部で常温の約40倍、非ノッチ部で常温の約50倍であったが、電流が小さくまた計測器の精度も悪く正確さは十分でない。

図6は、表1の全ケースについて限流動作終了時点(Y点)を起点として、ノッチ部の抵抗率比 $\rho l_1 / \rho_0$ をひとつのグラフに示したものである。Y点ではいずれの抵抗率比も30～40となり I_{RL} との相関は見られなかった。Y点以降ではいずれの場合も時間の経過とともに低下しているが、 I_{RL} が大きくなるにしたがって低下のしかたが遅く、復旧しにくくなることを示している。とくにケース④では限流動作完了後6.5msの時点で1.7ms巾のNaの微小な気化が、ケース⑤ではY点以降80msまでに1.6～3.2ms巾の6回の微小な気化が発生し、抵抗の低下が遅れた。さらにケース⑤では、200ms以降は抵抗が減少しなかった。200ms時点で素子の発熱と

図6. 限流動作完了後のノッチ部の復旧特性の I_{RL} 依存性

Fig.6. Influence of I_{RL} on the rehealing performance of constricted portion of the sodium element.

放熱が平衡状態になったものと推定される。また後述する「I-t特性」から6500A通電時の素子の限流開始時間は約0.3sである。したがってケース⑤の場合このまま継続して通電すれば素子は短時間のうちに再び限流動作に到るものと推定される。

図 7. Na の温度 - 抵抗率比特性

Fig. 7. Relative electrical resistivity vs. temperature characteristic of sodium.

以上の結果から、NCLは限流動作をした後においても、ある値以下の過渡的な過電流に対して電流を流しつつ復旧する機能を有していることが確認された。なお、表 1 の 5 つのケースにおける NF の遮断時間は、0.48～0.78 サイクル、平均 0.67 サイクルで、実際に用いられている製品と有意差はなかった。

ここで Na の抵抗が限流動作終了後の I_{RL} の値に依存せずいずれの場合も常温の 30～40 倍となる物理的意味について考察する。高圧力下における Na の沸点付近の抵抗率に関するデータは十分ではないが、図 7 に実線で示すような 1300°C までのデータ [5] の傾向を参考にすると、飽和蒸気圧下における液相の抵抗率曲線の延長による外挿が妥当であると考えられる。図 7 から本実験における限流動作終了時点の NCL の $\rho/\rho_0 = 30 \sim 40$ は、NCL の封入ガス圧力である 100 atm ($= 1.01 \times 10^7$ Pa) 以下に対応している。このことから NCL の磁器円筒内の Na は、限流動作終了時点で気体から液体に相変化しているものと推定される。またその時の液体 Na の温度は最高 1700°C 程度と推定される。

4. 主回路限流装置に適用する場合の過電流協調

前節の実験結果をもとに、実験で用いた NCL を図 2 に示す低圧コントロールセンタの主回路限流装置に適用する場合の過電流協調について検討する。

図 8 は過電流領域の協調を検討するための電流 - 時間 ($I-t$) 特性図である。図 8 において曲線は室温における NCL の $I-t$ 特性を、また矢印と丸印は実験において得られた NCL の限流動作後の再通電特性を示す。一方 $< 3.3 >$ において述べたように、分岐短絡事故除去後の健全負荷の過渡過電流の持続時間は最大で 0.15 s 程度であり、しかも減衰して定常値になっていく。以上のこと

図 8. コントロールセンタの過電流協調の検討図

Fig. 8. Overcurrent coordination of the sodium limiter for a motor control center.

から結論されることは、図 2 に示すような回路に本 NCL を適用する場合においては、NCL は定常運転中に分岐回路短絡事故が発生した場合でも短絡が除去されれば直ちに再通電が可能で、再通電電流の「大きさ」×「通電時間」の上限は NCL の定常状態の $I-t$ 特性でほぼ与えられると考えてよい。これによりコントロールセンタの主回路に設置した NCL と負荷側の電動機群との間の過電流協調が検討でき、回路設計が可能になる。

5. まとめ

短絡事故の際、短絡電流を限流することによって機器を保護する機能素子の一つとして、ナトリウム (Na) をエレメントに用いた自己復旧型の限流素子がある。本論文では、Na 限流素子と呼ぶこの素子について、限流動作後の復旧過程を実験的に詳細にあきらかにするとともに、この素子を低圧配電回路の一つであるコントロールセンタの主回路に適用した場合の過電流協調について検討を行った。結果をまとめると以下ようになる。

(1) Na 限流素子は、短絡電流が流れると Na が気化し、常温の千倍程度から数千倍ときには一万倍以上へと抵抗が急激に増加するとともに複雑に変化し、短絡電流を限流する。短絡電流が遮断されると、Na は瞬間的に液体状態に復旧し、素子の抵抗は瞬時に常温の 30～40 倍程度となり以後漸次低下する。

(2) Na 限流素子に過負荷相当の電流を重畳して流す場合においても、Na 限流素子は限流動作後 (1) と同様に復旧し、ひきつづき電流を流し続けることが可能である。この電流の「大きさ」×「通電時間」の上限は、ほぼ Na 限流素子の定常状態における「電流 - 限流動作開始時間」特性いわゆる $I-t$ 特性で与えられる。

(3) 以上の実験結果および考察から、低圧コントロール

センタの主回路にN a 限流素子を適用する場合，N a 限流素子と負荷の電動機群との過電流協調の検討ができ，最適な回路設計が可能となった。

最後に本研究を進めるにあたりご指導を頂いた宮本紀男教授（金沢工業大学，当時三菱電機中央研究所主任研究員），ならびに種々ご指導，ご助言を頂いた鬼頭幸生教授（名古屋大学）に厚くお礼申し上げます。

（平成5年7月12日受付）

文 献

- (1) T. Itoh, T. Miyamoto, Y. Wada, T. Mori & H. Sasao :
" Design Consideration on the P.P.F. for a
Control Center " , IEEE Trans. Power Apparatus &
Systems, Vol. PAS-92, No. 4, pp1292~1297 (1973-8)
- (2) Y. Wada, Y. Takagi, T. Mori, S. Hamano, T. Miyamoto
& T. Itoh : " Usefulness of Permanent Power Fuse in
Control Centers with Molded Case Circuit Breakers
", IEEE Trans. Industry Applications, Vol. IA-16,
No. 1, pp30~38 (1980-1/2)
- (3) 和田，浜野，森，宮本，堀田：「自己復旧形限流素子
（永久ヒューズ）の自己復旧特性」電気学会開閉保護装
置研究会，SPD-76-4，（1976）
- (4) 熊野・寺野・増井：「電気-機械系回路網解析プログ
ラム」，昭49電気学会関西支部連大，G3-47
- (5) A. N. Solov'ev : " Temperature Dependence of the
Electrical Resistivity of Liquid Metals " , High
Temperature, pp165~166 (1969-9)

和田 勇一 （正員）昭和16年9月1日生。40年静岡大学工学部電気工学科卒業。同年4月三菱電機(株)入社。以来，中央研究所にて電力用開閉機器，限流装置などの研究開発に従事。現在開閉機器研究開発グループのマネジャー。電気学会の受配電システム開閉保護予防保全技術調査専門委員会委員長。

プラズマ・核融合学会およびIEEE会員。

浜野 末信 （正員）昭和24年7月28日生。43年岡山県立笠岡工業高校卒業。同年4月三菱電機(株)入社。中央研究所を経て平成5年4月から同社伊丹製作所に勤務。51年大阪府立工業短期大学卒業。入社以来，電力用開閉機器の研究開発に従事。現在ガス遮断器の開発に従事。

森 貞次郎 （正員）昭和18年11月20日生。37年兵庫県立尼崎工業高校卒業。同年4月三菱電機(株)入社。以来，中央研究所にて電力用開閉機器，限流装置などの研究開発に従事。