

XTAP 例題集		番 号	RELAY-02
例題名	続流遮断型アークホーンと送電線保護リレーの協調検討		
分 野	架空送電, 系統保護		
文 献	<ul style="list-style-type: none"> ● 大高, 亀田, 「続流遮断型アークホーンと送電線保護リレーの協調」, 電力中央研究所報告 研究報告 H10009, 2011 年 5 月 ● 大高, 岩田, 田中, 合田, 「続流遮断型アークホーンの電流遮断シミュレーションモデルの開発 (その 2) -アークコンダクタンス依存型モデルの開発・適用-」, 電力中央研究所報告 研究報告 H06007, 2007 年 5 月 ● 大高, 岩田, 田中, 合田, 多田納, 友永, 上村, 「続流遮断型アークホーンの電流遮断シミュレーションモデルの開発 -基本アークモデルの構築-」, 電力中央研究所報告 研究報告 H05013, 2006 年 6 月 		
概 要	<p>続流遮断型アークホーン (以降 AH) は落雷に伴う故障電流を瞬時に遮断する雷害対策装置であり, 停電や瞬時電圧低下の低減に大きな貢献を果たしている。66/77 kV 架空送電線用の短絡電流遮断型については, 10 kA までの故障電流を交流 1 サイクル以内に遮断する機能を持つ。本来, AH により故障電流を遮断すれば, 送電線保護リレー (以降 Ry) が遮断器を開放して送電線を遮断する必要はない。しかし, AH により故障電流を遮断しても, Ry が故障を検出して送電線を遮断する事例が確認されている。</p> <p>本例題は, 故障発生点 (リレー設置点からの距離) や AH 電流遮断時間 (0.5 サイクルか 1 サイクルか) をパラメータとして, AH や Ry の動作を解析するものであり, AH と Ry の重複遮断を回避するための協調検討に資するものである。</p>		

解析回路・解析条件

モデル系統の単線結線図を図 1 に示す。片端電源の 66 kV, 50 Hz 系統であり、送電線については線種 ACSR 520 mm², 亘長 20 km を想定している。背後インピーダンスは 12.1 mH であり、変電所至近端で 3LG が発生した場合の故障電流は 10 kA (AH の最大遮断電流と同値) となる。変電所の変圧器中性点は、容量 200 A の抵抗器 (NGR) を介して接地されている。

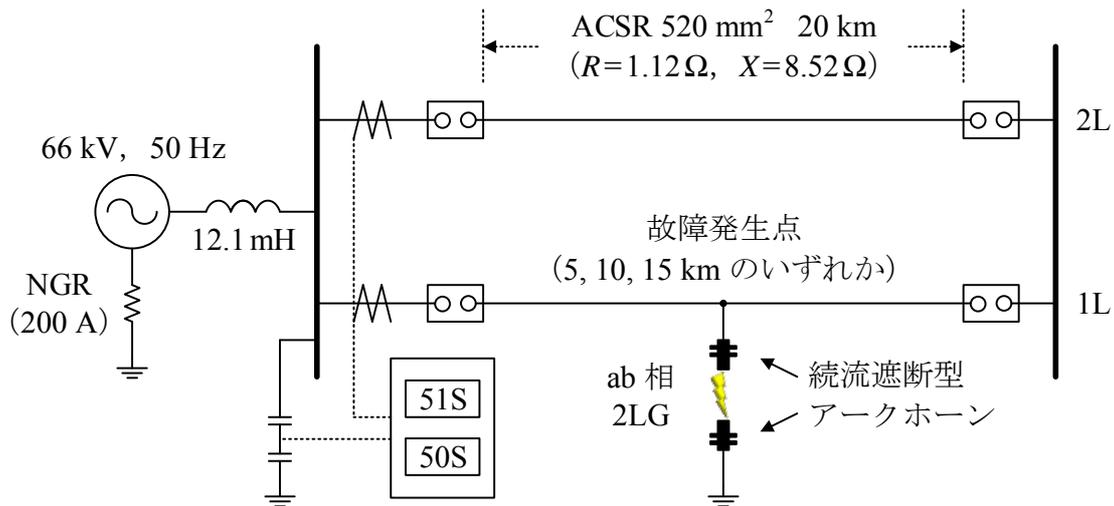


図 1 モデル系統の単線結線図

【 解析する現象 】

66 / 77 kV 系統の送電線保護には、自端判定型の保護リレーが短絡・地絡故障別に設置されていることが多く、後備保護は設置されていない場合が多い。Ry の故障検出時間は一般的に短絡故障の方が早く、AH の電流遮断時間と競争になる可能性があるのは短絡リレーのみと考えられる。このため、本例題で対象とする Ry は、主保護に適用される短絡リレーのうち、過電流リレー (51S)、距離リレー (44S) の 2 種類とした。

想定する故障ケースは ab 相の 2LG とし、故障発生点はリレー設置点から 5, 10, 15 km 地点のいずれか、AH 電流遮断時間は 0.5 サイクルと 1 サイクルのいずれかとした。なお、AH が故障電流を 0.5 サイクルで遮断する場合と 1 サイクルで遮断する場合があるのは、故障条件 (故障電流、故障位相) や周囲環境 (気象、設備形態) に起因するバラつきによるものである。

以上の条件により、故障発生時の AH や Ry の動作を解析する。

【 継続遮断型アークホーンのモデル 】

詳細は先の文献に示しているが、当所では短絡電流遮断試験で得られた電流・電圧波形を用いて 66/77 kV 短絡電流遮断型 AH の電流遮断シミュレーションモデルを開発している。

このモデルは、従来から遮断器の巨視的アークモデルとして利用されている Cassie モデル^[1]と Mayr モデル^[2]を組み合わせたものであり、アークホーン間で発生するアークコンダクタンスを故障発生から故障除去まで精度良く模擬することができる。

また、先に述べたように AH には電流遮断時間のバラつきがあるが、XTAP 上では故障電流が遮断される零点を明確に指定できた方が Ry との協調を検討しやすい。このため、AH の電流遮断シミュレーションモデルでは、故障電流が遮断される零点が 1 回目か 2 回目かを選択できるようになっている。具体的には、電流を継続させたい零点では Cassie モデルを使用して、電流を遮断したい零点でのみ Mayr モデルを使用するようにしている。なお、Cassie モデルと Mayr モデルの概要は、例えば文献 [3] においても紹介されている。

【 過電流リレーのモデル 】

過電流リレーについては、線路末端 (20 km 地点) での 2LG 電流が 2,670 A であったことから、相電流 2,500 A、線間電流に換算して 4,330 A ($2,500 \times \sqrt{3}$) を整定値とした。振幅値演算には 2 値加算法^[4]を適用し、この演算アルゴリズム自体にフィルタ効果が含まれていることから、デジタルフィルタ演算の適用は省略した。

・振幅値演算 (2 値加算法)

$$D_m = |I_m| + |I_{m-3}| + \frac{1}{2} \left| |I_m| - |I_{m-3}| \right| \dots\dots\dots (1)$$

$$D_{51S} = \frac{1}{k_{51S}} (D_m + D_{m-1} + D_{m-2}) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 D_{51S} は過電流リレーの演算値、 k_{51S} は演算の過程で発生する振幅値のゲイン、 $I_m = I_{1m} - I_{2m}$ (線間電流) である。 D_{51S} が整定値の 4,330 A を上回ったときに Ry 動作となる。また、添え字の $m-T$ は「電気角 $T \times 30 \text{ deg}$ 前の時刻」を表しており、例えば $m-1$ は電気角 30 deg の遅れ、 $m-3$ は電気角 90 deg の遅れを表す。なお、アナログフィルタは考慮せず、故障継続確認用カウンタの確認時間は電気角 60 deg とした。

【 距離流リレーのモデル 】

距離リレーについては、計器用変成器やリレー自体のアナログ誤差により保護区間を越えた事故に対しても動作することのないように、主保護として即時遮断が可能な保護範囲を全体の保護区間の 80 % 程度としている^[5]。このため、本例題ではリレー設置点から 80 % (16 km) の地点までを保護範囲とし、 $0.8 X = 6.81 \Omega$ を整定値とした。これまでに当所が試験した広く使用されている実リレーを参考に、振幅値演算には最大感度角 75 deg の積形演算^[4]、デジタルフィルタ演算には差分フィルタ^[4]を適用した。

- ・振幅値演算（最大感度角 75 deg 積形演算）

$$D_{44S} = \frac{1}{k_{44S}} \frac{V_m^2 + V_{m-3}^2}{(I_m + I_{m-1})V_{m-3} - (I_{m-3} + I_{m-4})V_m} \dots\dots\dots (3)$$

- ・デジタルフィルタ演算（差分フィルタ）

$$y_m = \frac{1}{2}(x_m - x_{m-6}) \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 D_{44S} は距離リレーの演算値、 k_{44S} は演算の過程で発生する振幅値のゲイン、 $I_m = I_{1m} - I_{2m}$ （線間電流）、 $V_m = V_{1m} - V_{2m}$ （線間電圧）である。 D_{44S} が整定値の 6.81 Ω を下回ったときに Ry 動作となる。また、 x_m はデジタルフィルタの入力値、 y_m はデジタルフィルタの出力値である。なお、アナログフィルタは考慮せず、故障継続確認用カウンタの確認時間は電気角 60 deg とした。

【 送電線の模擬 】

線種は ACSR 520 mm²、亘長は 20 km である。本例題では、検討を簡単化するため「π 型等価回路線路モデル」を使用した。

【 解析条件 】

解析条件は以下の通りとする。

- ・計算時間刻み：0.1 μs
- ・計算開始時間：0 ms
- ・計算終了時間：50 ms
- ・表示開始時間：0 ms
- ・表示終了時間：50 ms

また、AH の部品をダブルクリックすると、故障発生時刻と電流遮断時間を指定できるようになっており、Ry (51S, 44S) の部品をダブルクリックすると、系統周波数や整定値を指定できるようになっている。

【 XTAP 入力例 】

本例題を XTAP 上で作成した例を図 2 に示す。過電流リレーと距離リレーについては 1L のみの使用であるため、2L の模擬は省略した。AH や Ry (51S, 44S) については部品化を施しており、詳細なモデルについては部品化図編集より閲覧することができる。

例題名：続流遮断型アークホーンと送電線保護リレーの協調検討

番号：RELAY-02 (XTAP本体：Ver.2.00, 例題ファイル：Ver.1.0)

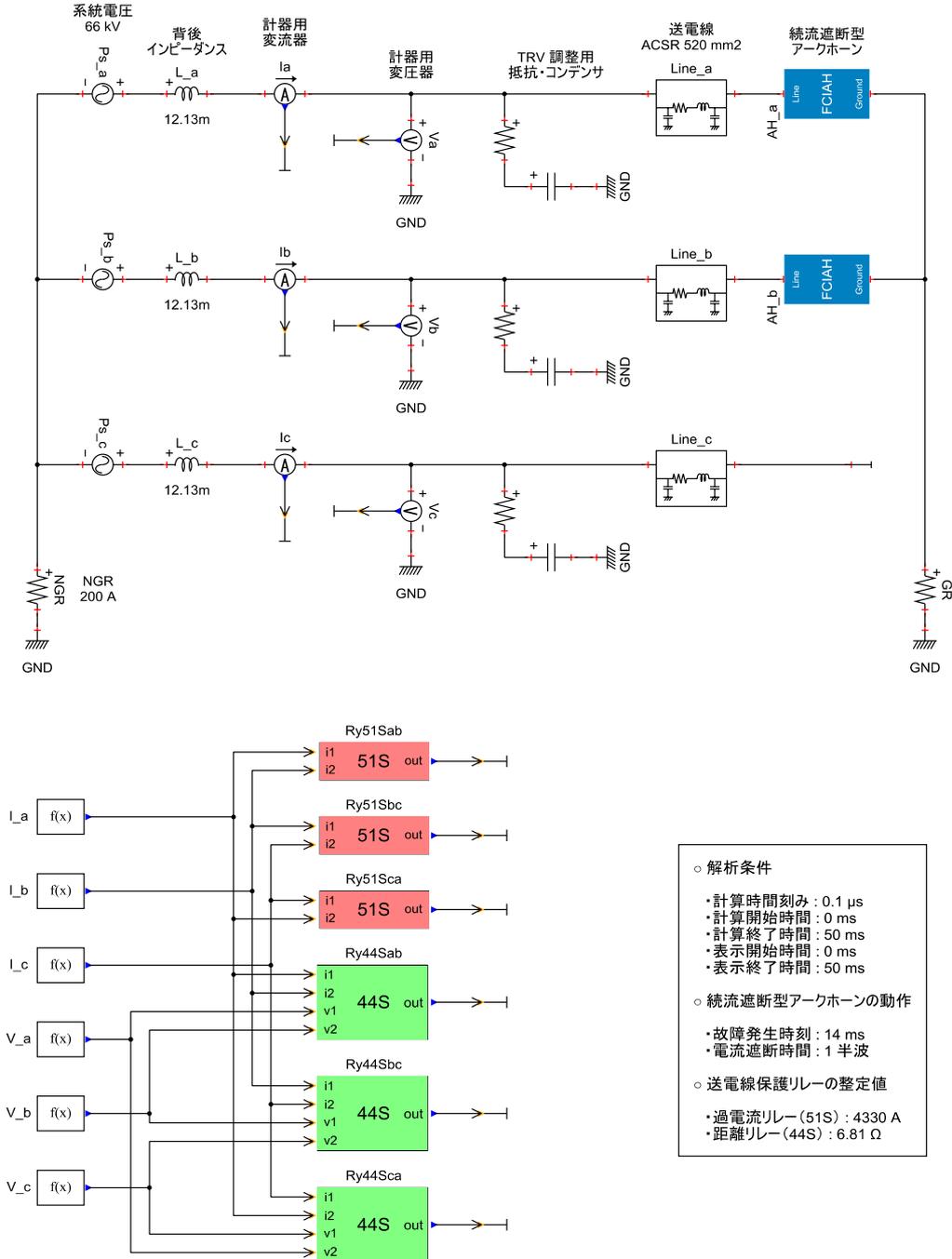


図 2 XTAP 入力例

解析結果

ここでは、例として、故障発生点をリレー設置点から 10 km とし、AH 電流遮断時間を 0.5 サイクルと 1 サイクルにした場合の解析結果を示す。

まず、AH 電流遮断時間を 0.5 サイクルとした場合である。図 3 に電流波形、図 4 に電圧波形、図 5 に 51S 演算値、図 6 に 51S 出力、図 7 に 44S 演算値、図 8 に 44S 出力を示す。

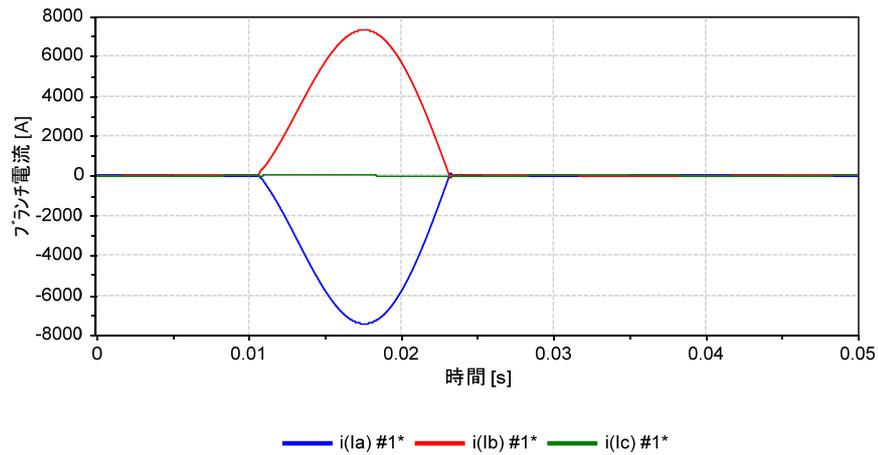


図 3 0.5 サイクル遮断時の電流波形

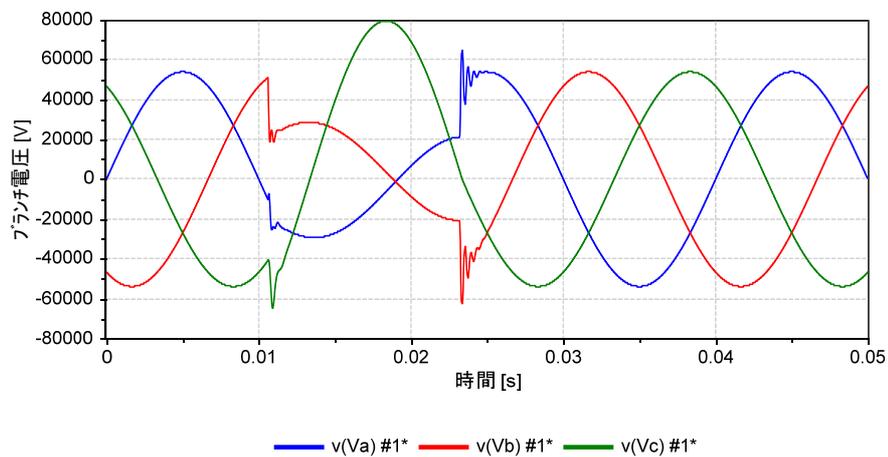


図 4 0.5 サイクル遮断時の電圧波形

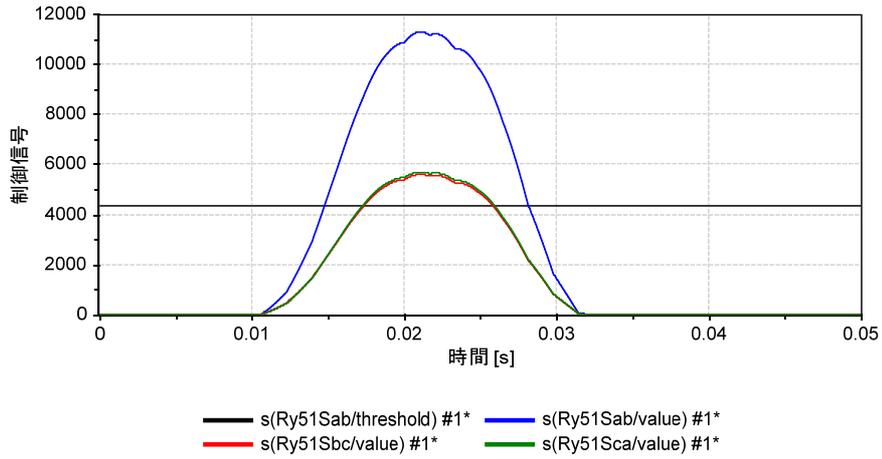


図5 0.5 サイクル遮断時の51S 演算値（黒線は整定値）

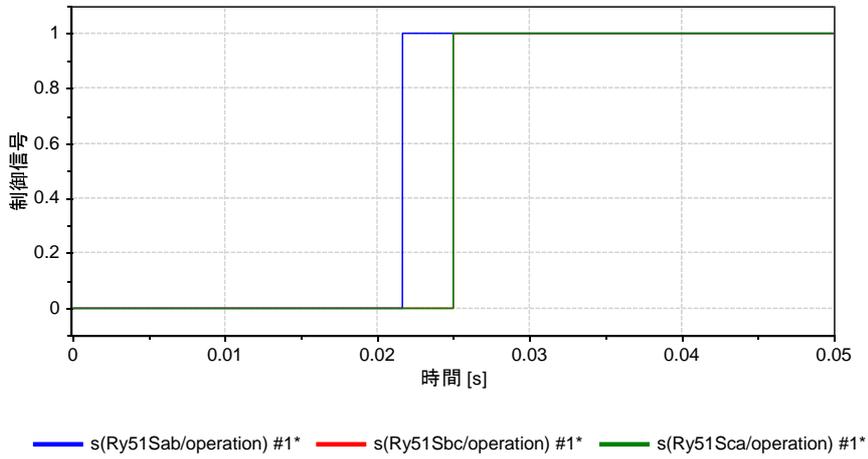


図6 0.5 サイクル遮断時の51S 出力

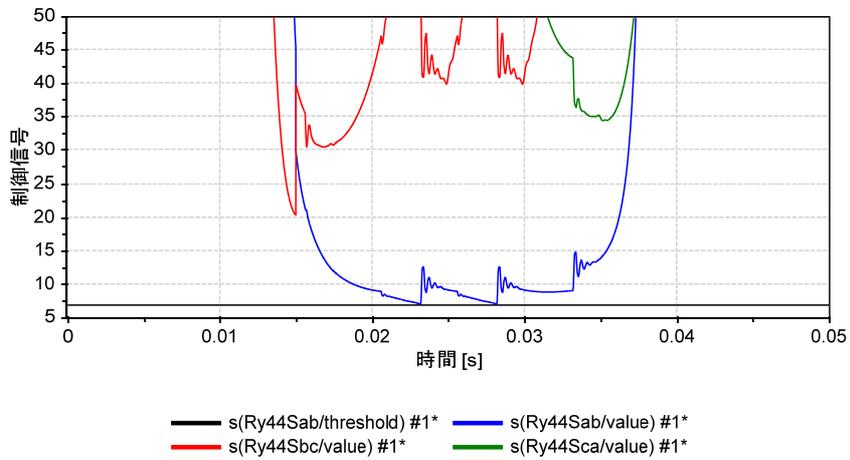


図7 0.5 サイクル遮断時の44S 演算値（黒線は整定値）

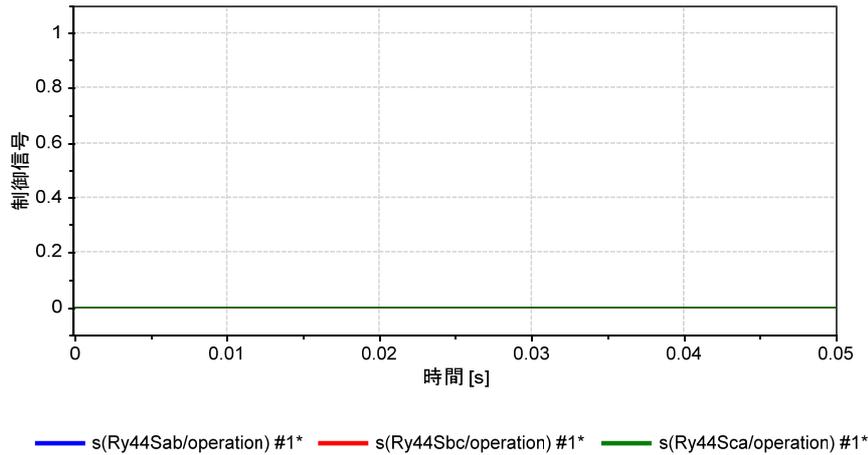


図 8 0.5 サイクル遮断時の 44S 出力

図 5, 図 6 より, 過電流リレーについては ab 相, bc 相, ca 相のいずれの演算値も整定値を上回り, Ry 動作となった。一方, 図 7, 図 8 より, 距離リレーについては ab 相の演算値が整定値を一瞬下回るものの, 故障継続確認用カウンタの確認時間である電気角 60 deg を超えなかったため, Ry 不動作となった。

次に, AH 電流遮断時間を 1 サイクルとした場合である。図 9 に電流波形, 図 10 に電圧波形, 図 11 に 51S 演算値, 図 12 に 51S 出力, 図 13 に 44S 演算値, 図 14 に 44S 出力を示す。

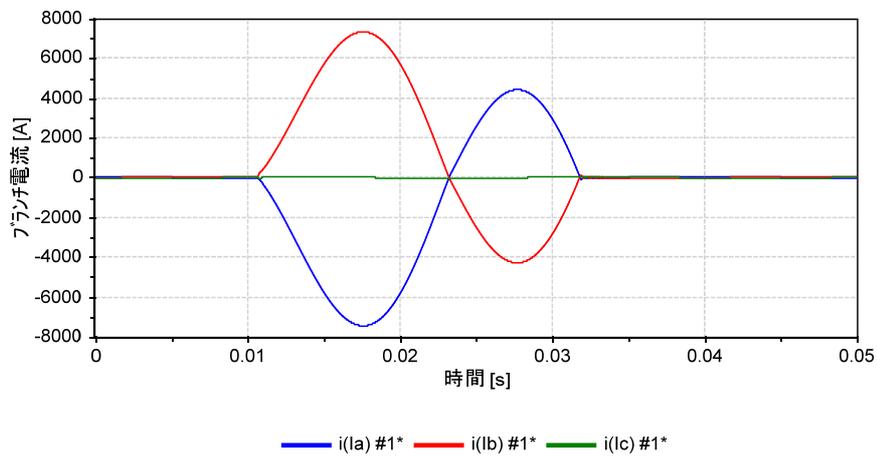


図 9 1 サイクル遮断時の電流波形

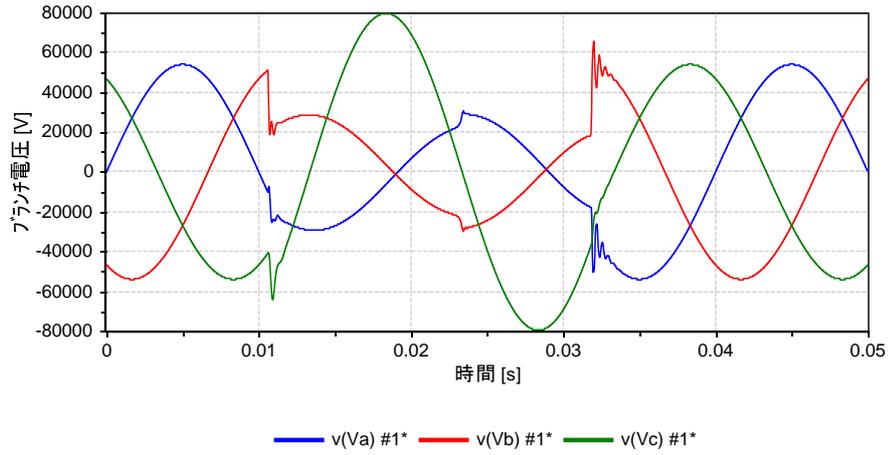


図 10 1 サイクル遮断時の電圧波形

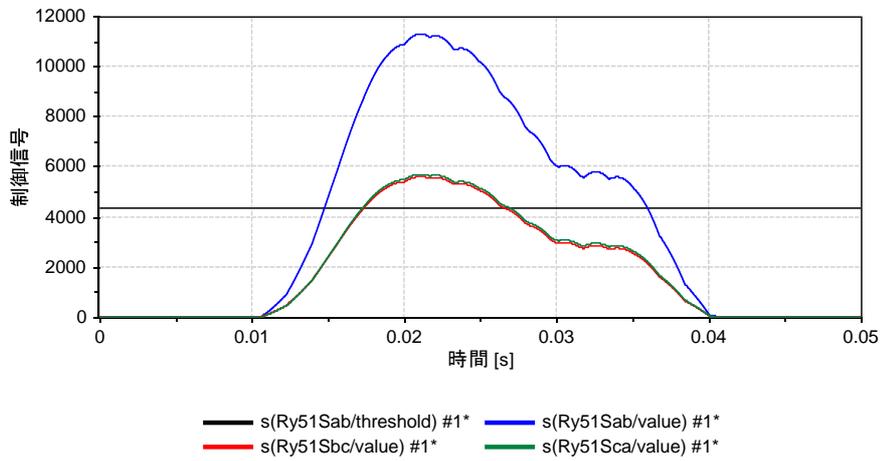


図 11 1 サイクル遮断時の 51S 演算値 (黒線は整定値)

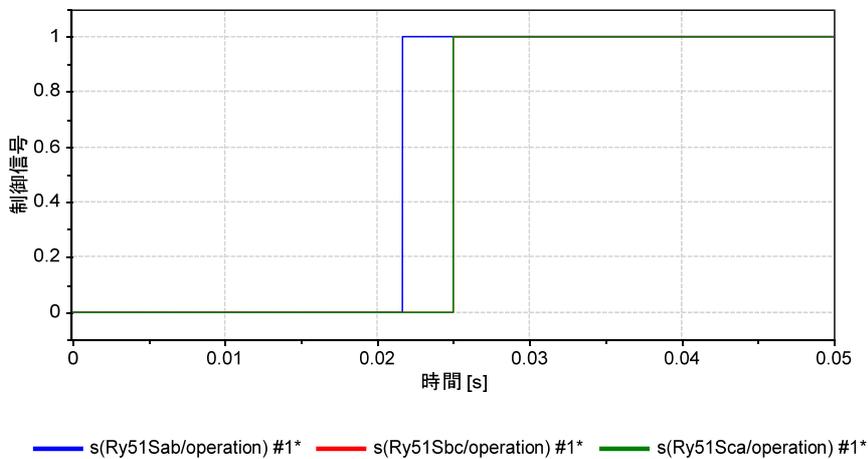


図 12 1 サイクル遮断時の 51S 出力

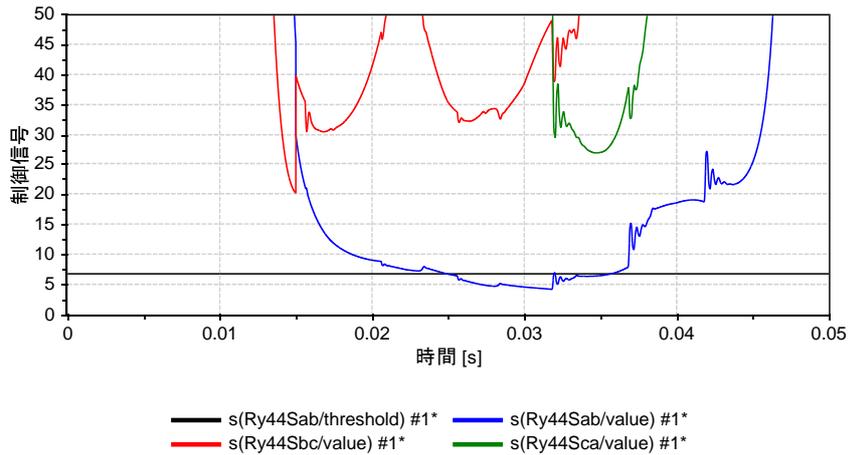


図 13 1 サイクル遮断時の 44S 演算値 (黒線は整定値)

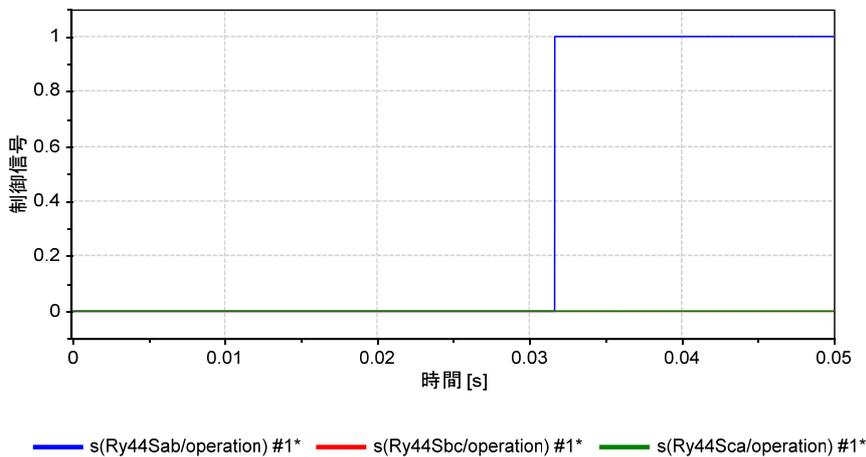


図 14 1 サイクル遮断時の 44S 出力

図 11, 図 12 より, 過電流リレーについては 0.5 サイクル遮断と同様に ab 相, bc 相, ca 相のいずれの演算値も整定値を上回り, Ry 動作となった。また, 図 7, 図 8 より, 距離リレーについても ab 相の演算値が整定値を下回り, 故障継続確認用カウンタの確認時間である電気角 60 deg も超えたため, Ry 動作となった。

なお, 故障発生点をリレー設置点から 5, 15 km とした場合の結果も含め, Ry の不要動作有無を整理したところ, 表 1 のようになった。表中の ○ は不要動作なし, × は不要動作ありを表している。

表 1 送電線保護リレーの不要動作有無

故障点	AH 電流遮断時間	51S リレー不要動作				44S リレー不要動作			
		ab 相	bc 相	ca 相	総合	ab 相	bc 相	ca 相	総合
5 km	0.5 サイクル	×	×	×	×	×	○	○	×
	1 サイクル	×	×	×	×	×	○	○	×
10 km	0.5 サイクル	×	×	×	×	○	○	○	○
	1 サイクル	×	×	×	×	×	○	○	×
15 km	0.5 サイクル	×	○	○	×	○	○	○	○
	1 サイクル	×	○	○	×	○	○	○	○

表 1 より、全体的に距離リレーよりも過電流リレーの方が動作傾向となることが分かる。また、故障点がリレー設置点に近い場合、続流遮断型アークホーン電流遮断時間が 0.5 サイクルから 1 サイクルへと延伸した場合に Ry の不要動作が発生しやすくなることも分かる。

ただし、Ry との協調を図ることが困難な場合でも、故障発生箇所での続流アークによる設備損傷を低減することができるため、架空送電システムの雷害対策という観点からは AH を設置することは非常に有効である。今後も AH の普及拡大に期待したい。

参考文献

- [1] A. M. Cassie, “Arc Rupture and Circuit Severity: A New Theory”, CIGRE Report, No.102 (1939)
- [2] O. Mayr, “Beiträge zur Theorie des statischen und des dynamischen Lichtbogen”, Archiv für Electrotechnik, Vol.37, pp.588-608 (1943)
- [3] 一般社団法人電気学会：「電気工学ハンドブック（第7版）」，オーム社，pp.886-887（2013）
- [4] 保護リレーシステム基本技術調査専門委員会：「保護リレーシステム基本体系技術」，電気学会技術報告，第 641 号（1997）
- [5] 大浦：「保護リレーシステム工学」，オーム社，pp.174-175（2002）

以 上

更 新 履 歴

日 付	例題ファイル バージョン	変 更 内 容
2015/07/01	1.0	初版作成（XTAP Version 2.01 用）