

# 1 線地絡事故時の零相電流の流れ(向き)と位相角

質疑応答 2023-0235 (現場とトラブル) 多重接地による地絡保護の不要動作 で提起されたトラブル事例の単線系統図 (図 1) を電力系統解析 etap に入力し、1 線地絡事故時の零相電流の流れ(向き)と位相角について検討し、① EVT による多重接地の影響、② ケーブルのキャパシタンスによる充電電流の影響について検証した。

## 1. 系統のモデリング

### 1.1 単線系統図

質疑応答 2023-0235 で質問のあった地絡方向継電器 67 の不要動作が生じ単線系統図 (図 1) を、図 2 のように etap に入力した。

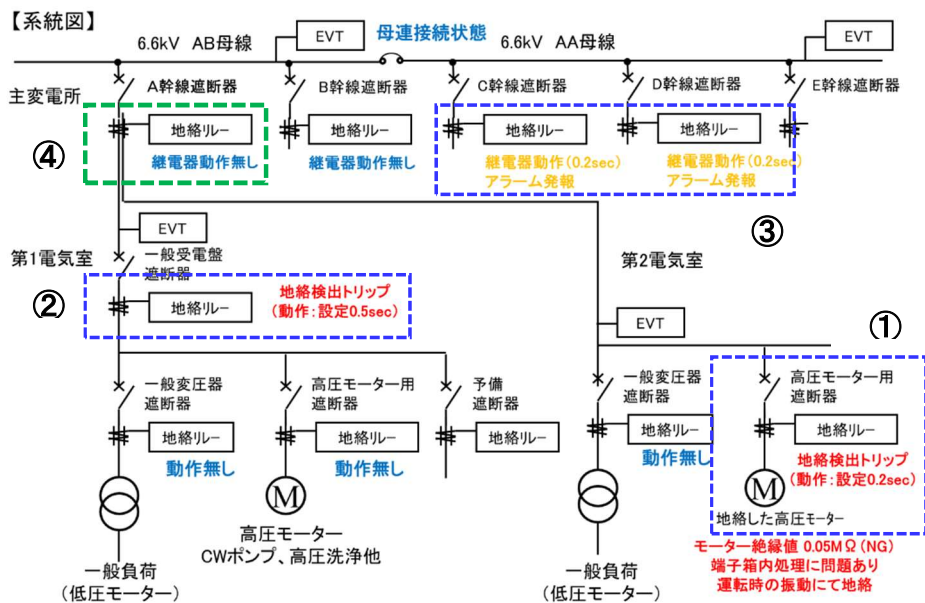


図 1 地絡方向継電器 67 の不要動作が生じ単線系統図

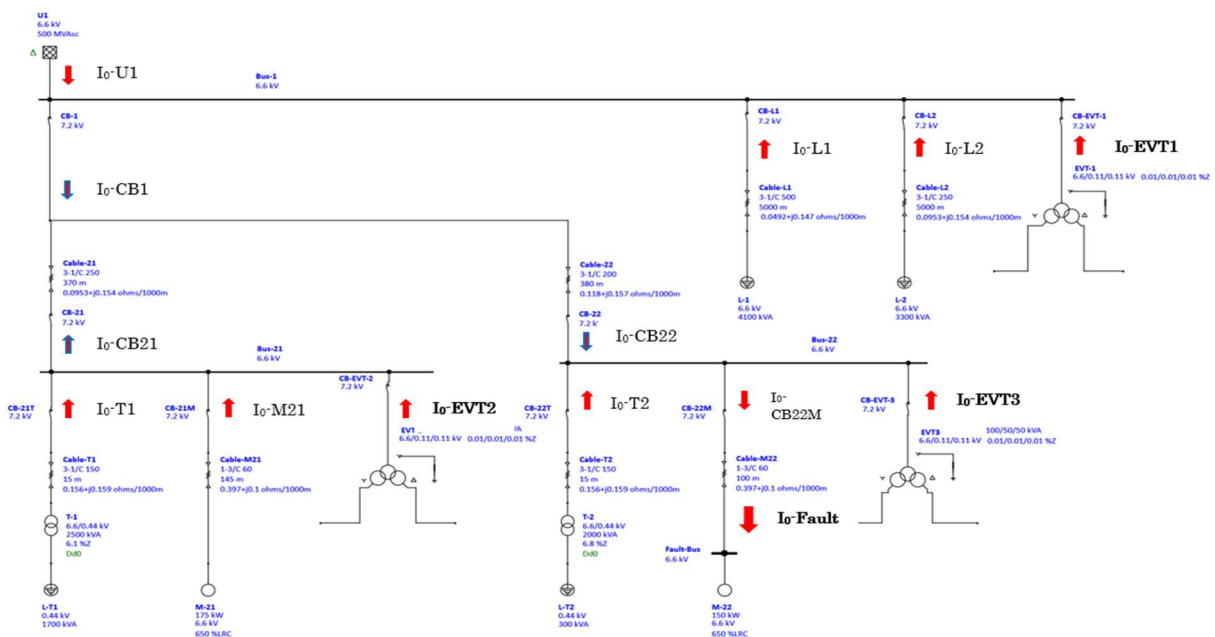


図 2 etap に入力した単線系統図 (零相電流の流れと向き)

## 1.2 入力データ

etap に入力した機器のデータを表 1 にまとめた。

表 1 etap に入力した機器のデータ

1. 6.6kV 系統の短絡容量	ID	短絡容量				
	U1	500MVA				
2. EVT (電圧比、節約抵抗値)	ID	電圧比	節約抵抗			
	EVT-1	6600/√3 : 110/√3 : 190/3	25Ω			
	EVT-2	6600/√3 : 110/√3 : 190/3	25Ω			
	EVT-3	6600/√3 : 110/√3 : 190/3	25Ω			
3. Cable (タイプ、電圧、条数、サイズ、長さ)	ID	タイプ	電圧	条数	サイズ	長さ
	Cable-21	CV250sq-1C	6600	3	250	370
	Cable-22	CV200sq-1C	6600	3	200	380
	Cable L1	CV500sq-1C	6600	3	500	5000 <sup>(Note)</sup>
	Cable-L2	CV250sq-1C	6600	3	250	5000 <sup>(Note)</sup>
	Cable-T1	CV150sq-1C	6600	3	150	15
	Cable-M21	CV60sq-3C	6600	1	60	145
	Cable-T2	CV150sq-3C	6600	1	150	15
	Cable-M22	CV60sq-3C	6600	1	60	100
4. 変圧器 (結線、電圧比、容量、%Z)	ID	結線	電圧比	容量	%Z	
	T-1	△-△	6600/440	2500	6.1	
	T-2	△-△	6600/440	2000	6.8	
5. 電動機 (電圧、容量、極数、力率、効率)	ID	電圧	容量	極数	力率	効率
	M-21	6600V	175kw	4P	0.9	0.9
	M-22	6600V	150kw	4P	0.9	0.9
6. 負荷 (電圧、容量、力率)	ID	電圧	容量	力率		
	L-1	6600V	4100KVA	0.85		
	L-2	6600V	3300KVA	0.85		
	L-T1	440V	1700KVA	0.85		
	L-T2	440V	300KVA	0.85		

(Note) 実際のフィーダ数が 20 フィーダくらいあるので、ケーブルの長さを実際の10倍くらいの長さ (500mx10=5000m) として入力した。

## 1.3 EVT のモデリングと検証

変圧比 6600/√3 : 110/√3 : 190/3(V)、制限抵抗  $R_e=25(\Omega)$  の EVT を図 3 のように中性点抵抗  $R_n$  による中性点接地方式に回路変換(等価回路)して etap に入力した。

ここで、1 次と 3 次の変圧比は、 $n = 6600/\sqrt{3} : 190/3 = 6600 : 190/\sqrt{3} \Rightarrow 6600 : 110$

$3R_n = (R_e/3) \times n^2$  より、 $R_n = (25/3^2) \times (6600/110)^2 = 10,000(\Omega)$  となるので、中性点抵抗  $R_n = 10,000(\Omega)$  として入力した。

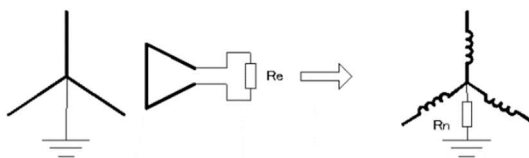


図 3 EVT の回路変換(等価回路)

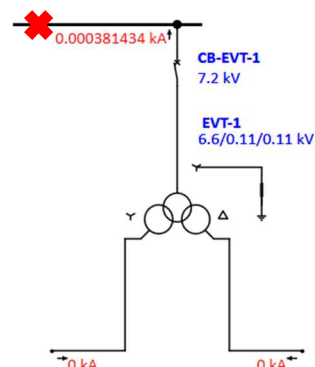


図 4 etap による  $I_g=3I_0$  の計算

この EVT の 1 次端子で完全 1 線地絡事故が生じた場合の地絡電流  $I_g$  は、 $I_g = 6600/\sqrt{3} / 10,000 = 0.381(A) = 381(mA)$  となる。これを etap で計算すると図 4 のように、 $I_g=3I_0=0.000381434(kA)=0.381(A) = 381(mA)$  となり、etap による EVT のモデリングは妥当と言える。

## 2. ケーススタディと計算の結果

EVT による多重接地の影響、およびケーブルの大地静電容量による充電電流の影響について検証するために、下記の4つケースについて計算した。

- (1) Case 1A : 3つの母線で EVT 接地をし、ケーブルの大地静電容量による充電電流を考慮した場合
- (2) Case 1B : 3つの母線で EVT 接地をし、ケーブルの大地静電容量による充電電流を無視した場合
- (3) Case 2A : 1つの母線で EVT 接地をし、ケーブルの大地静電容量による充電電流を考慮した場合
- (4) Case 2B : 1つの母線で EVT 接地をし、ケーブルの大地静電容量による充電電流を無視した場合

計算の結果を表 2 にまとめた。etaplによる計算結果（零相電流の値と方向）については、5 頁以降の資料を参照して下さい。

表 2 etapl にケーススタディの結果（零相電流、地絡電流と零相電圧との位相）

Branch ID	Case-1A (Three EVT, With Cable)			Case-1B (Three EVT, Without Cable)			Case-2A (One EVT, With Cable)			Case-2B (One EVT, Without Cable)			$I_0$ in Branch CB (Vector Sum)
	$I_0$ (kA)	$I_g = 3I_0$ (A)	Angle (deg)	$I_0$ (kA)	$I_g = 3I_0$ (A)	Angle (deg)	$I_0$ (kA)	$I_g = 3I_0$ (A)	Angle (deg)	$I_0$ (kA)	$I_g = 3I_0$ (A)	Angle (deg)	
$I_0$ -U1 ①	0.000000	0.000	0.00	0.000000	0.000	0.00	0.000000	0.000	0.00	0.000000	0.000	0.00	
$I_0$ -EVT1 ②	0.000127	0.381	0.00	0.000127	0.381	0.00	0.000127	0.381	0.00	0.000127	0.381	0.00	
$I_0$ -L1 ③	0.004427	13.281	89.95	0.000000	0.000	0.00	0.004427	13.281	89.95	0.000000	0.000	0.00	
$I_0$ -L2 ④	0.003301	9.902	89.95	0.000000	0.000	0.00	0.003301	9.903	89.95	0.000000	0.000	0.00	
$I_0$ -CB1 a	0.007729	23.187	89.01	0.000127	0.381	0.00	0.007729	23.187	89.01	0.000127	0.381	0.00	$a = ①+②+③+④$
$I_0$ -EVT2 ⑤	0.000127	0.381	0.00	0.000127	0.381	0.00	(Open)	(Open)	(Open)	(Open)	(Open)	(Open)	
$I_0$ -T1 ⑥	0.000009	0.028	0.00	0.000000	0.000	0.00	0.000009	0.028	0.00	0.000000	0.000	0.00	
$I_0$ -M21 ⑦	0.000064	0.192	89.96	0.000000	0.000	0.00	0.000064	0.192	89.96	0.000000	0.000	0.00	
$I_0$ -CB21 b	0.000147	0.441	29.98	0.000127	0.381	0.00	0.000735	2.205	89.96	0.000000	0.000	180.00	$b = ⑤+⑥+⑦$
$I_0$ -CB22 c	0.008281	24.843	88.19	0.000254	0.762	0.00	0.008278	24.835	89.07	0.000127	0.381	0.00	$c = a + b$
$I_0$ -EVT3 ⑧	0.000127	0.381	0.00	0.000127	0.381	0.00	(Open)	(Open)	(Open)	(Open)	(Open)	(Open)	
$I_0$ -T2 ⑨	0.000009	0.028	0.00	0.000000	0.000	0.00	0.000009	0.028	0.00	0.000000	0.000	0.00	
$I_0$ -CB22M d	0.008296	24.887	87.32	0.000381	1.143	0.00	0.008288	24.863	89.08	0.000127	0.381	0.00	$d = c + ⑧+⑨$
$I_0$ -Fault e	0.008340	25.019	87.33	0.000381	1.143	0.00	0.008332	24.996	89.08	0.000127	0.381	0.00	$e = d + \text{CableM22}$

### 3. etapl 計算結果の検証 : 表 2 にまとめたケーススタディの結果から次のことが言える。

- (1) 図 4 より、EVT の 1 次端子で完全 1 線地絡事故が生じた場合、この 1 台の EVT より地絡電流  $I_g$  **0.381(A)** が事故点に向かって流れる。
- (2) Case 1B および Case 2B（ケーブルの大地静電容量による充電電流を無視した場合）は、EVT からの地絡電流（1 台あたり 0.381A）が事故点に向かって流れる。すなわち、表 2 に青枠で囲ったように、Case 1B では EVT3 台分の 1.143(A)、Case 2B では Case 1B では EVT1 台分の 0.381(A) の地絡電流が事故点に向かって流れる。
- (3) Case 1A および Case 2A（ケーブルの大地静電容量による充電電流を考慮した場合）は、EVT からの地絡電流に加え、ケーブルの大地静電容量による充電電流（位相は零相電圧に対して進み  $90^\circ$ ）が重畳される。結果として、表 2 に赤枠で囲ったように、Case 1A では 25.019(A)、位相  $87.33^\circ$ 、Case 2A では 24.996(A)、位相  $89.08^\circ$  地絡電流が事故点に向かって流れる。
- (4) この結果から、図 1 のように複数の EVT による多重接地をしても、これが原因で地絡事故を起こしていないフィーダの地絡継電器 67 が不要動作することは無い。
- (5) 系統のケーブルの大地静電容量による充電電流が大きい場合も、図 2 のように電動機 M-22 の端子付近で 1 線地絡事故が生じた場合、事故が生じたフィーダの地絡方向継電器 67 とフィーダ CB1 およびフィーダ CB22 の 67 以外は、地絡電流の向きが 67 の動作領域に対して逆向きの

流れになるので、この事故で不要動作することは無い。ただし、CB1 およびフィーダ CB22 の 67 はこの事故で動作するのが正常な動作と言える。よって、上位系統の 67 と下位系統の 67 は時限をとった設定とすることが必要である。

- (6) 図 5 に、各スタディケースの 1 線地絡電流の大きさと向き(零相電圧との位相)を地絡方向継電器の動作曲線状にプロットした。この例題では、EVT から供給される制限抵抗による電流(位相  $0^\circ$ ) が小さく、ケーブルの大地静電容量による充電電流(位相  $90^\circ$ ) がかなり大きいいため、Case 1A および Case 2A では、地絡電流の大きさが 24~25(A)、位相が  $87\sim 89^\circ$  となっている。
- (7) 一般的に地絡方向継電器の最大感度角は概ね進み  $30^\circ\sim 60^\circ$  くらいなので、安定した地絡保護を行うために、[質疑応答 2023-0235 \(現場とトラブル\) 多重接地による地絡保護の不要動作](#) で説明している、**GTR による接地方式**、GTR を新たに設置することが困難な場合は、**所内電源用変圧器を兼用する方式**を採用し、10~30A 高抵抗接地方式とする方法も有効である。

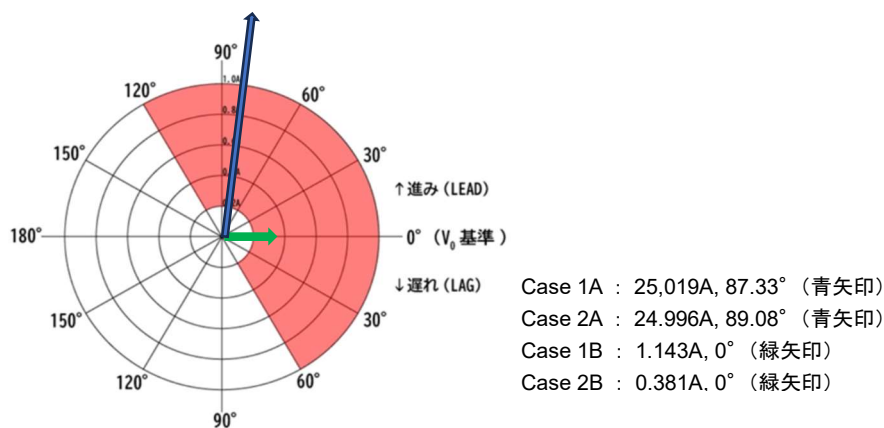
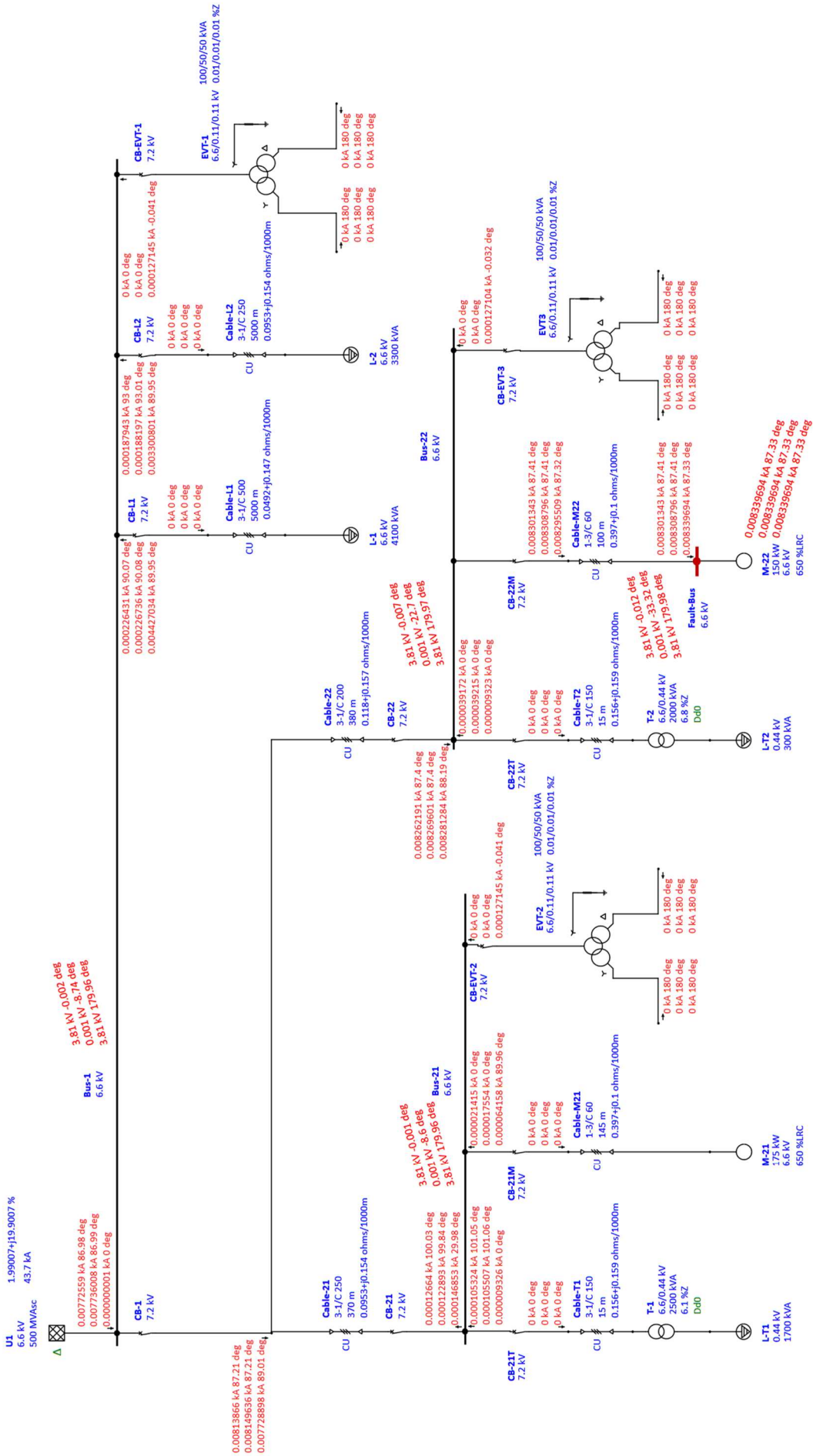


図 5 事故点に向かって流れる地絡電流の大きさと向き

4. この例題の系統(図 1)の評価 : etap 計算結果の検証結果から次のことが言える。

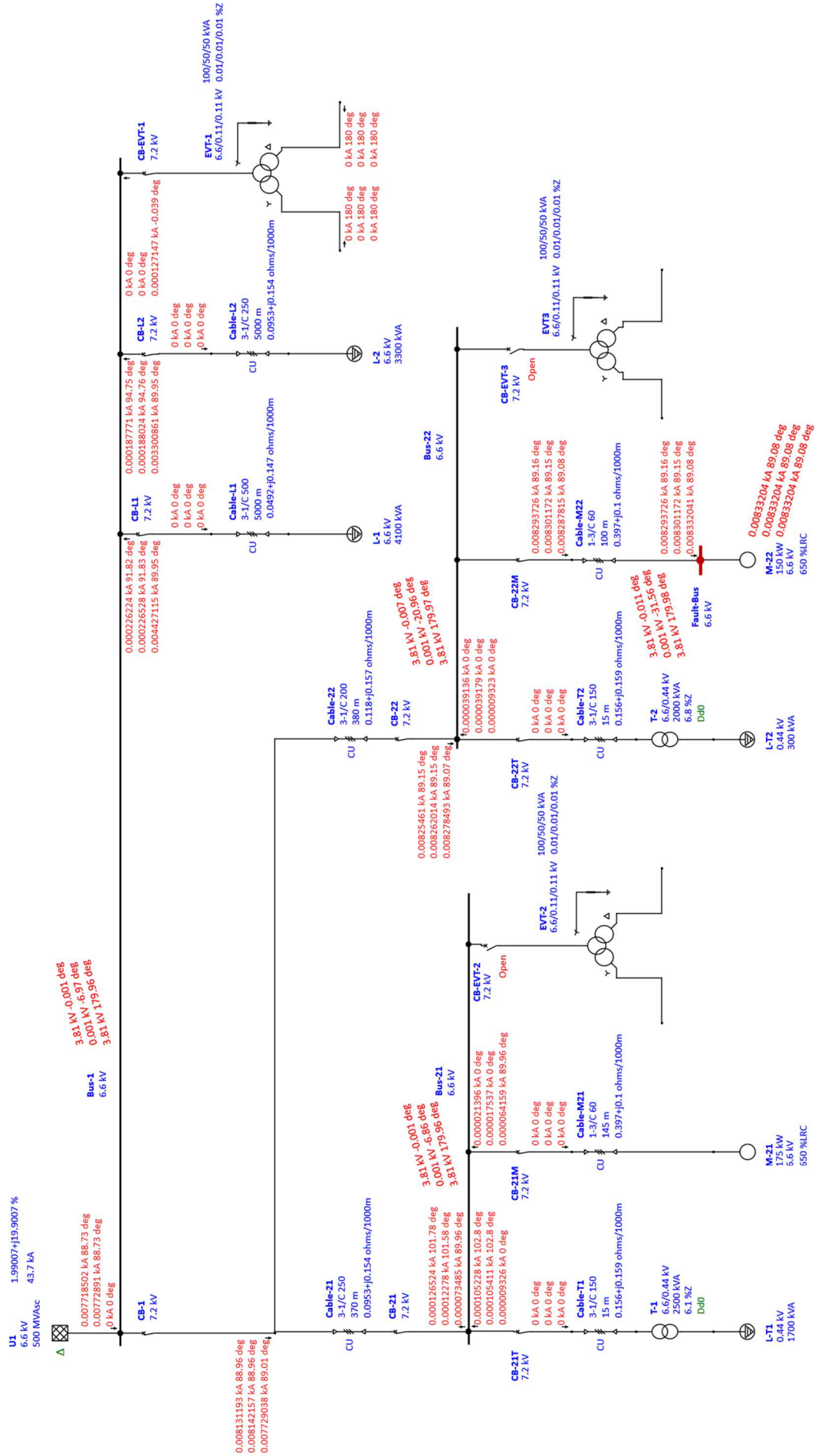
- (1) 図 1 の高圧モータで地絡事故に対して、① の方向地絡継電器 67 が動作したが、これは正常動作と言える。
- (2) この時、② の 67 も同時に動作したが、これは地絡電流の向きから判断して不要動作と言える。時限も 0.5 sec に設定しているので、継電器自体の異常、設定間違い、結線ミスなどが考えられる。
- (3) ③ の 67 のアラーム発報も不要動作と言える。継電器自体の異常、設定間違い、結線ミスなどが考えられる。
- (4) ④ の 67 が「継電器動作なし」となっているが、地絡電流の向きから不要動作する恐れがある。このように 67 の配置がカスケード配置になっている場合は、上位系統と下位系統の 67 は時限をとった設定とすることが望ましい。
- (5) この系統のように、ケーブルの大地静電容量による充電電流が大きい場合は、**GTRによる接地方式**、あるいは、**所内電源用変圧器を兼用する方式**を採用して、10~30A 高抵抗接地方式とする方法も有効である。
- (6) なお、このようにケーブルの亘長が非常に長い場合は、過渡応答解析を行い、実際に地絡した瞬間の過渡現象を明確にして評価した方が良い。



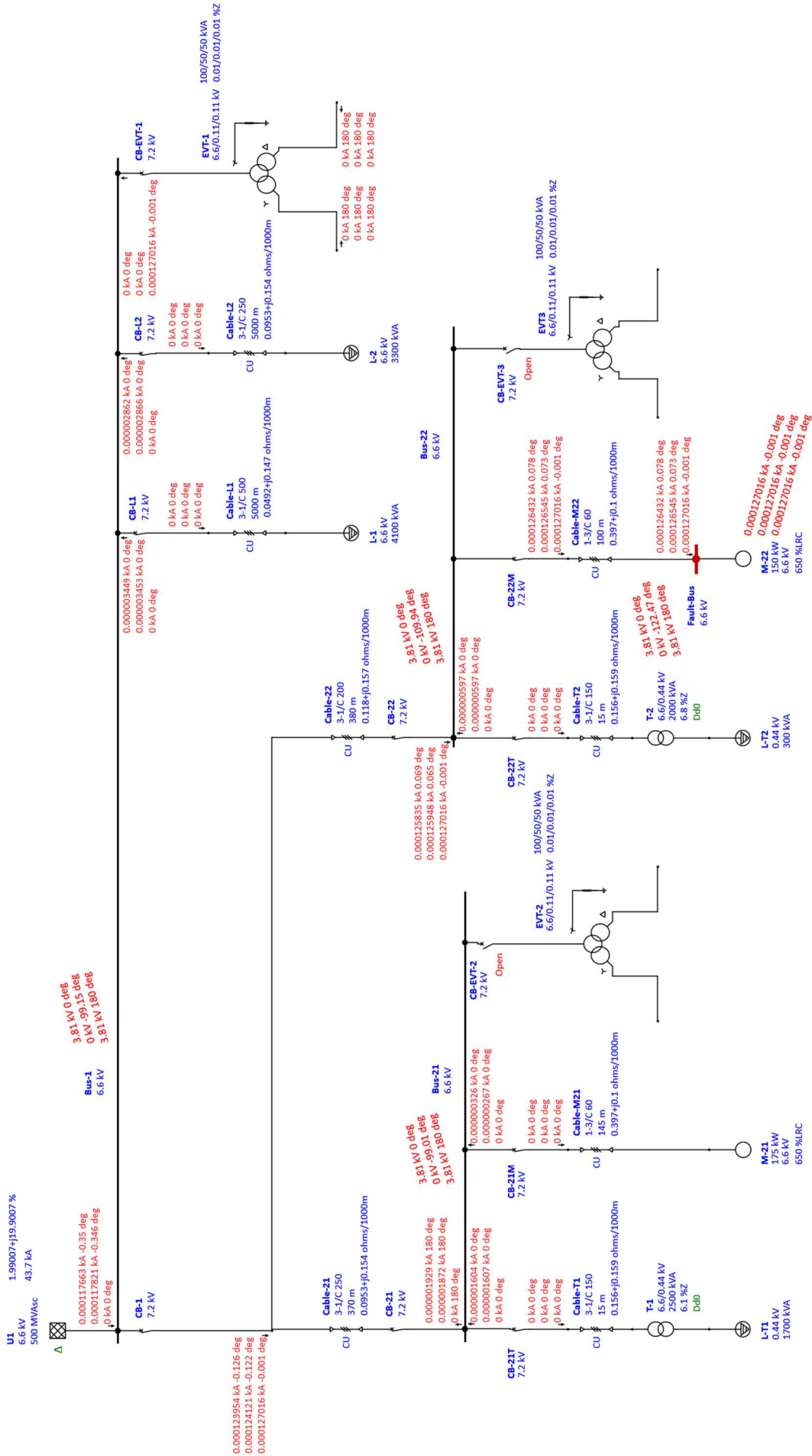


Case-1A (Three EVT, With Cables)





Case-2A (One EVT, With Cables)



Case-2B (One EVT, Without Cables)