组群贯通供电方式牵引变电所进线继电保护方案研究

靳松

（中铁第一勘察设计院集团有限公司，陕西 西安 710043）

摘要：针对组群贯通供电，分析其牵引变电所电源进线牵引侧的故障类型和继电保护配置。对于进线牵引所侧来说，当发生各种类型短路故障时，电网侧提供的短路电流受到牵引变压器限制；通过接触网绕送的短路电流受到接触网阻抗限制，牵引侧的短路电流一般较小。进线发生各种单相和相间短路，差动保护均能启动。如果无法安装纵联差动保护，当单相牵引变压器连接在电源进线 AB 相间时，应配置低电压启动的 A 相和 B 相功率方向保护，其中 A 相功率参考正方向由牵引变压器指向进线；B 相功率方向参考正方向由进线指向牵引变压器。

关键词：组群贯通供电系统；电源进线；继电保护方案

Research on relay protection scheme for power supply incoming line in continuous power supply system with grouped traction substations

JIN Song

(China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: This paper analyzes the fault types and relay protection configuration of the traction side of the traction substation power incoming line in continuous power supply system with grouped traction substations. For the traction side of the power incoming line, when various types of short circuit faults occur, the short circuit current provided by the grid side is limited by the traction transformer. The short circuit current sent through the catenary line is limited by the impedance of the overhead catenary line, and the short circuit current in the traction side is generally small. Differential protection can be started when various single and phase short circuits occur in the incoming line. If the longitudinal differential protection cannot be installed, when the single-phase traction transformer is connected to the power supply input line AB phase, the low-voltage starting phase A and phase B power direction protection should be configured, in which the positive reference direction of A-phase power is pointed to the input line by the traction transformer; The power direction of phase B refers to the positive direction from the incoming line to the traction transformer.

Key words: continuous power supply system with grouped traction substations; power supply incoming line;relay protection scheme

中国国家铁路集团有限公司科技研究开发项目 SY2020G001

0 引言

2017年国务院印发“十三五”现代综合交通运输体系发展规划的通知，要求到2020年铁路营运里程要达到15万km，铁路电气化率达到70%。某海拔超过4000 m的高原电气化铁路，集中了复杂艰险环境、开行时速达200 km/h、30‰大坡道等难点和特点，且工程条件极端特殊，全线桥隧比例超过90%，最高地震烈度达到9度，具有独一无二的复杂性和特殊性，对既有牵引供电技术提出了新的挑战。

目前我国电气化铁路为单边供电，在牵引变电所与分区所出口处需要设置电分相[1-2]。列车过电分相，会存在失电、增加列车运行时间、产生过电压、影响弓网状态、降低供电可靠性等问题，且单边供电方式不利于列车再生电能吸收，造成电能浪费。采用组群贯通供电方式（即牵引网双边供电），不仅能有效减少牵引变电所配置数目、外部电源工程和主要供电设备安装容量，还可以延长供电距离，并显著降低两部制电价方式下牵引供电系统的运行电费成本，保障供电系统的持续性和可靠性[3-8]。

对双边贯通供电方式下的牵引供电能力、对电力系统影响、保护测控方案、电分段运行适应性、牵引变压器绕组并联运行等方面进行试验验证，为供电方案的优化设计提供重要依据，为高原铁路的建设提供支撑，为双边贯通供电模式的推广应用打下基础。

组群贯通供电方式由于牵引网构成双边供电，进线的电网侧和牵引变电所侧均有电源，当进线发生故障时，不仅电网变电所向进线注入故障电流，牵引网也会向进线注入故障电流，电网侧跳闸后，还需要进线的牵引变电所侧进行跳闸，并切除故障。因此，需要在牵引变电所进线开关处增加继电保护，本文对该继电保护配置方案进行研究，为试验的安全可靠及组群贯通供电方式牵引供电系统的应用提供继电保护方面的参考。

1 牵引所电源进线故障分析

三座牵引所构成的组群贯通供电系统如图1所示。三座牵引变电所110 kV外部电源来自同一地方变电站，以D到E的牵引变电所左侧AT所供电区间为例，给出了贯通分段供电的牵引网结构，其他供电分段牵引网结构相同，不再赘述。

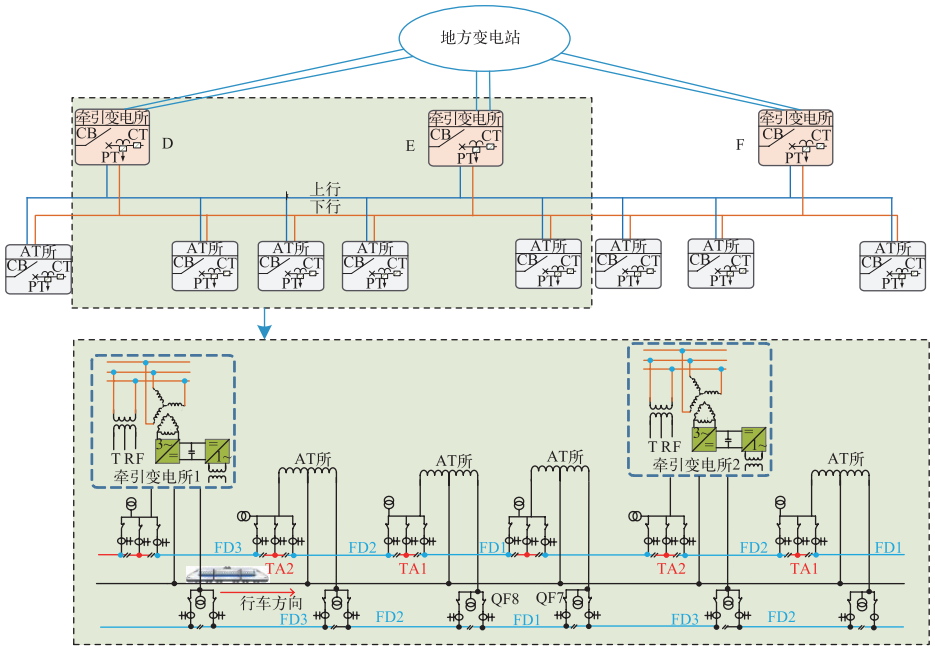

图 1 三座牵引所构成的组群贯通供电系统

Fig. 1 Continuous power supply system with three traction substations

组群贯通供电系统牵引变压器均采用单相变压器，接在电源进线的AB相间，在牵引变电所增加同相供电补偿设备，以消除负序、谐波对电网的影响，对无功功率进行补偿以提高功率因数。考虑到投资、工期等，不增加同相供电补偿设备，只进行接触网的双边供电试验。从电网变电所到牵引变电所均为两回路三相输电线路，铁路牵引所变压器为完全备用系统，只有一回路进线投入运行，当运行的进线出现故障或因其他原因失电时，再通过备自投切换到另外一回路进线。此种情况下，牵引变压器接在电网进线A相、B相之间，进线C相悬空。

上述组群贯通系统由三个牵引所构成，为分析简便，可以只用两个牵引所构成的双边供电系统，如图2所示。

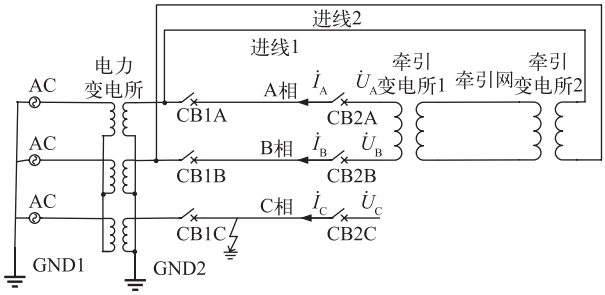

图 2　两个牵引变电所构成的双边供电示意图

Fig. 2 Schematic diagram of bilateral power supply formed by two traction substations

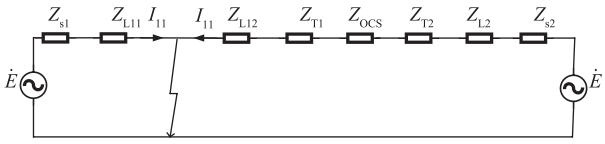

图 3　进线 1 故障时的电路示意图

Fig. 3 Schematic diagram of circuit when incoming line 1 fails

图3为进线1中发生短路故障的电路图。图3中，$\dot{E}$为电源电动势；Z_{s1}为进线1对应的系统阻抗；Z_{L11}为进线1首端到故障点的阻抗；Z_{L12}为进线1末端到故障点的阻抗；Z_{T1}为牵引变压器1的阻抗；Z_{OCS}为接触网的阻抗；Z_{T2}为牵引变压器2的阻抗；Z_{L2}为进线2末端到故障点的阻抗；Z_{s2}为进线2对应的系统阻抗；P_{11}为进线1电网侧短路电流；P_{12}为进线1牵引变电所侧短路电流。由图3可得

$$I_{11}=\frac{E}{Z_{s1}+Z_{L11}} \tag{1}$$

$$I_{12}=\frac{E}{Z_{s2}+Z_{L2}+Z_{T2}+Z_{OCS}+Z_{T1}+Z_{L12}} \tag{2}$$

双边供电时，供电臂长度至少为单边供电的两倍，且接触网电压等级为27.5 kV，接触网阻抗Z_{OCS}归一到110 kV，将会远大于110 kV进线阻抗；相对于电力系统110 kV或以上的系统容量，牵引变压器1和2的容量要小得多，故阻抗Z_{T1}和Z_{T2}比较大，远大于110 kV进线阻抗；因此，式（2）得到的进线1牵引变电所侧短路电流将会非常小，给进线牵引侧的继电保护配置带来极大困难。

如果进线上安装有光纤差动保护，则进线发生两相短路、三相短路时，差动保护都能同时切除进线电网侧和牵引侧开关，光纤差动保护装置一般也将相应的电流保护作为后备保护，此时，在进线牵引侧可不再增加新的保护原理或装置。但是电力系统一般在220 kV及其以上电压等级的线路才装设差动保护装置，组群贯通供电在推广初期，主要应用在西部人烟稀少、电力系统比较弱的地区，通过增加牵引供电臂长度来减少牵引变电所数量，其进线电压等级以110 kV居多。此时，电力系统变电所侧一般装设距离保护，而进线牵引侧没有继电保护功能。在此种情况下，必须在进线牵引变电所侧增加继电保护。双边供电时，对于进线来说，两侧都有电源，需要在进线牵引变电所加装带方向的电流保护或距离保护。

1.1　进线发生C相单相短路

由于双边供电时，牵引变电所采用单相变压器，如图4所示。进线发生C相单相短路时，进线牵引侧C相短路电流I_c基本为零，此时不管加装的是带方向的电流保护还是距离保护，都不会起作用。由于电力变电所变压器中性点接地，此时U_c将会降低，可以加装失电压保护切除进线C相单相短路；如果是高电阻故障，U_c降低不到定值，保护仍检测不到故障，此时需要等到电力变

电所侧CB1断路器处的距离保护动作后，失电压保护才能启动断开牵引变电所侧断路器CB2。这样会增加一定的延时，但C相进线牵引变电所侧没有连接，不会带来更多的危害。

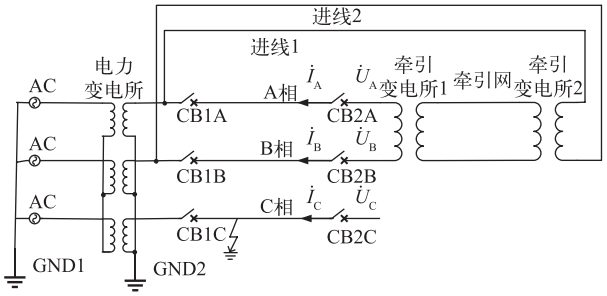

图 4　双边供电电路 C 相进线短路接地示意图

Fig. 4 Schematic diagram of short-circuit grounding of C phase in bilateral power supply circuit

1.2　进线发生B相单相短路

如图5所示，进线发生B相单相短路时，由于牵引变压器高压侧无中性点，短路电流由电力变电所变压器提供，其电流方向如图5中虚线所示。这种情况与图6所示的双边供电电路有牵引负荷的电流方向一样，对于该处保护的功率参考方向来说，A相是反向，B相是正向。对于B相金属性接地故障，由于短路电流要经过A相线路全程和牵引变压器，因此短路电流很可能与牵引所需电流相近，单纯的功率方向保护无法区分是B相单相接地故障还是有牵引负荷。但金属性短路时，B相电压降低，所以距离保护和低电压启动的带方向电流保护可以用于B相金属性接地短路。

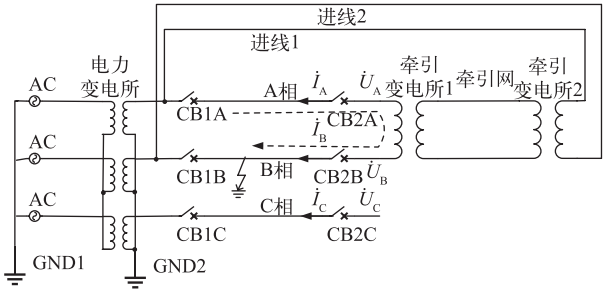

图 5　双边供电电路 B 相进线短路接地示意图

Fig. 5 Schematic diagram of short-circuit grounding of phase B of bilateral power supply circuit

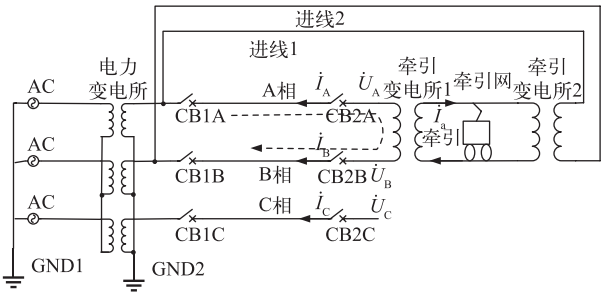

图 6　双边供电电路牵引负荷示意图

Fig. 6 Schematic diagram of traction load on bilateral power supply circuit

1.3　进线发生A相单相短路

如图7所示，进线发生A相单相短路时，由于牵引变压器高压侧无中性点，短路电流只由电力变电所变压器提供，其电流方向如图7中虚线所示。这种情况与图8所示的双边供电电路有再生制动的电流方向一样，对于该处保护的功率参考方向来说，A相是正向，B相是反向。对于A相金属性接地故障，由于短路电流要经过B相线路全长和牵引变压器，因此短路电流很可能与再生电流相近，单纯的功率方向保护无法区分是A相单相接地故障还是有再生制动。但金属性短路时，A相电压降低，所以距离保护和低电压启动的带方向电流保护可以用于A相金属性接地短路。

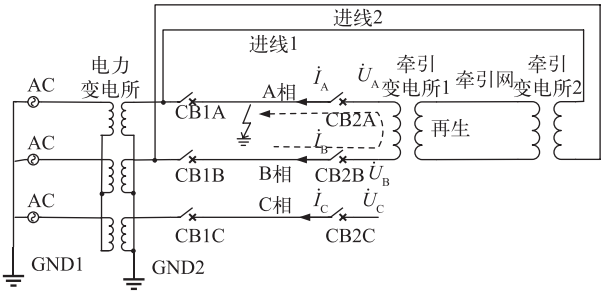

图 7　双边供电电路 A 相进线短路接地示意图

Fig. 7 Schematic diagram of short-circuit grounding of phase A of bilateral power supply circuit

1.4　进线发生AB相间短路

如图9所示，进线发生AB相间短路时，此种情况与1.3所描述的A相接地短路一样，只是此时短路电流通过牵引网提供。短路电流要经过接触网线路全长和两台牵引变压器、右侧牵引所进

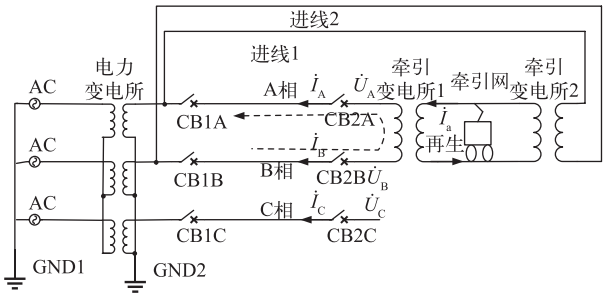

图 8　双边供电电路再生制动电流方向示意图

Fig. 8 Schematic diagram of regenerative braking current direction of bilateral power supply circuit

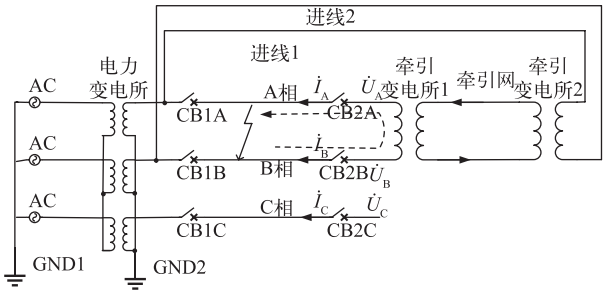

图 9　双边供电电路进线 AB 相间短路示意图

Fig. 9 Schematic diagram of AB interphase short circuit of bilateral power supply circuit

线，其短路电流将小于1.3所描述情况，AB相间电压降低。单纯的功率方向保护无法区分是AB相间短路还是有再生制动。

1.5　进线发生AC相间短路

如图10所示，进线发生AC相间短路时，此种情况与1.3所描述的A相接地短路一样，只是此时短路电流通过牵引网提供。短路电流要经过B相进线全长和牵引变压器，AC相间电压降低。单纯的功率方向保护无法区分是AC相间短路还是有再生制动。

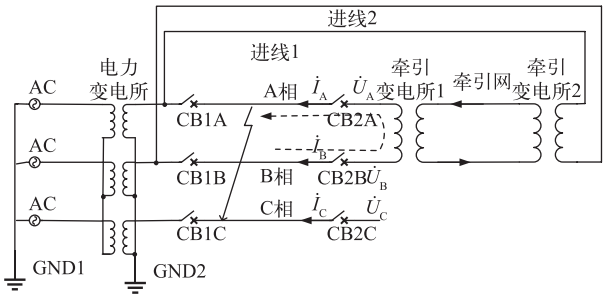

图 10　双边供电电路进线 AC 相间短路示意图

Fig. 10 Schematic diagram of AC interphase short circuit of bilateral power supply circuit

1.6　进线发生BC相间短路

如图11所示，进线发生BC相间短路时，此种情况与1.2所描述的B相接地短路一样，只是此时短路电流通过牵引网提供。短路电流要经过A相进线全长和牵引变压器，BC相间电压降低。单纯的功率方向保护无法区分是BC相间短路还是列车负荷电流。

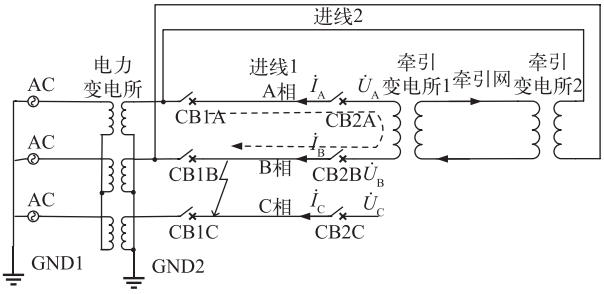

图 11　双边供电电路进线 BC 相间短路示意图

Fig. 11 Schematic diagram of BC interphase short circuit of bilateral power supply circuit

2　仿真验证

仿真参数如下：接触网采用单线AT供电，AT容量为32 MV·A，AT短路电压百分比为5%，AT段长度为15 km，共4个AT段；接触线自阻抗为（0.148 534+j0.586 168）Ω；钢轨自阻抗为（0.083 098+j0.444 793）Ω；正馈线自阻抗为（0.170 248+j0.716 382）Ω；接触线和钢轨互阻抗为（0.049 348+j0.304 063）Ω；接触线和正馈线互阻抗为（0.049 348+j0.342 784）Ω；钢轨和正馈线互阻抗为（0.049 348+j0.291 514）Ω；牵引变压器电压比为110 kV/27.5 kV，容量为25 MV·A，短路电压百分比10%；电力进线正序阻抗为（0.132+j0.378）Ω，电力进线1长度为30 km，电力进线2长度为39 km。

电流参考方向都由母线指向线路。电力系统容量为500 MV·A时，进线1在牵引变电所侧发生金属性短路时的电压电流情况见表1。电力系统容量为2 000 MV·A时，进线1在牵引变电所侧发生金属性短路时的电压电流情况见表2。本文主要研究进线的牵引变电所侧的继电保护设置，故只展示了上述最有利于进线的牵引变电所侧的继

电保护配置的情况。

从表1和表2可以看出：

1）对于进线牵引所侧来说，当发生各种类型短路故障时，电网侧提供的短路电流受到牵引变压器限制，通过接触网绕送的短路电流受到接触网阻抗限制，牵引侧的短路电流一般较小。当仿真中电力系统容量为500 MV·A时，进线牵引侧短路电流没有超过150 A；当电力系统容量增加到2 000 MV·A时，进线牵引侧短路电流没有超过250 A。仿真时没有单独设置电力变压器，实际中电力变电所有电力变压器，而且有很多时候不是金属性短路，短路点可能更远离牵引变电所，短路电流会小于250 A。

2）当电力系统容量为500 MV·A，电网进线发生C相短路接地故障时，进线电网侧C相电流与牵引侧C相电流差为1 421 A，差动保护能够动作。当电网进线发生BC相短路接地故障时，进线电网侧C相电流与牵引侧C相电流差为1 488 A，差动保护能够动作。从表中可以看出，进线发生各种单相和相间短路，差动保护均能启动。

3）当电网进线发生C相短路接地故障时，牵引侧A相、B相电流均为6.478 A，且相差180°，牵引侧C相电流为0，所以功率方向保护和距离保护均不能启动。但C相电压为6.912 kV，远低于110 kV的额定相电压63.5 kV，故低电压保护可以保护跳闸。同时牵引侧A相、B相电压较额定相电压63.5 kV升高超过10%。可以利用C相低电压，而A相、B相电压没有降低来判断C相是否故障。

4）当电网进线发生B相短路接地故障时，牵引侧A相、B相电流均为57.12 A，且相差180°，A相电流流向牵引变压器，B相电流由牵引变压器流向线路，牵引侧C相电流为0，与接触网机车取流完全一致，且无法区分，所以功率

表 1　电力系统容量为 500 MV·A，电网进线发生短路故障时的电压电流情况

Tab. 1 Voltage and current situation of power system capacity 500 MV·A and power grid incoming line short-circuit fault

故障类型			AB 相间短路	BC 相间短路	AC 相间短路	ABC 三相短路	A 相短路接地	B 相短路接地	C 相短路接地
电网侧电压	A 相	模值 /kV	43.61	64.8	31.92	23.51	30.21	64.95	65.08
		相角（°）	0	0	0	0	0	0	0
	B 相	模值 /kV	31.35	43.93	64.71	23.1	64.79	30.17	65.07
		相角（°）	− 61.8	− 153.7	− 142.5	− 117.8	− 107.4	− 133.2	− 119.2
	C 相	模值 /kV	64.63	32.02	43.93	24.08	64.77	64.75	30.58
		相角（°）	154.7	142.5	63.79	121.9	133.2	119.6	107.9
电网侧电流	A 相	模值 /A	1 393	56.58	1 431	1 633	1 369	74.13	33.59
		相角（°）	− 5.661	171.7	− 123.6	− 50.87	− 58.06	144.6	74.87
	B 相	模值 /A	1386	1438	76.07	1636	85.98	1366	24.65
		相角（°）	173.6	− 159.9	− 111.6	192.7	− 55.07	169.2	− 24.53
	C 相	模值 /A	20.2	1488	1505	1721	24.4	25.4	1421
		相角（°）	− 115.6	19.04	56.96	70.81	− 121.1	− 162.9	49.85
牵引侧电压	A 相	模值 /kV	39.64	65.01	25.46	8.531	7.161	71.96	71.63
		相角（°）	− 21.74	0.576	31.04	− 38.86	− 58.26	8.159	− 7.791
	B 相	模值 /kV	25.3	39.66	64.79	7.719	71.67	7.129	71.43
		相角（°）	− 30.99	− 176	− 143.2	182.4	− 115.9	168.9	− 111.5
	C 相	模值 /kV	64.74	25.53	39.53	5.78	71.27	71.13	6.912
		相角（°）	154.7	175.2	40.45	79.34	141	111.7	49.64
牵引侧电流	A 相	模值 /A	25.3	57.27	67.72	125.4	63.49	57.12	6.478
		相角（°）	− 11.41	12.19	− 126.3	− 24.41	− 64.13	− 19.68	− 107.8
	B 相	模值 /A	125.3	57.27	67.72	125.4	63.49	57.12	6.478
		相角（°）	168.6	− 167.8	53.66	155.6	115.9	160.3	72.19
	C 相	模值 /A	0	0	0	0	0	0	0
		相角（°）	0	0	0	0	0	0	0

表 2　电力系统容量 2 000 MV·A，电网进线发生短路故障时的电压电流情况

Tab. 2 Voltage and current of power system capacity 2 000 MV·A when short-circuit fault occurs in power grid incoming line

故障类型			AB 相间短路	BC 相间短路	AC 相间短路	ABC 三相短路	A 相短路接地	B 相短路接地	C 相短路接地
电网侧电压	A 相	模值 /kV	54.43	63.83	46.55	45.41	50.14	63.86	63.88
		相角（°）	0	0	0	0	0	0	0
	B 相	模值 /kV	45.82	54.62	63.81	44.85	63.83	50.11	63.81
		相角（°）	− 101.5	− 134.5	− 123.2	− 119.1	− 114.7	− 125.3	− 119.9
	C 相	模值 /kV	63.79	46.55	54.63	45.73	63.81	63.76	50.36
		相角（°）	135.3	123.2	102.3	121.1	125.4	120	114.9
电网侧电流	A 相	模值 /A	2 716	106.6	2 723	3 145	2 272	109.9	32.21
		相角（°）	− 14.16	− 165.3	− 93.39	− 50.45	− 57.66	158.9	74.66
	B 相	模值 /A	2706	2738	134.1	3176	126.7	2273	24.34
		相角（°）	165.5	− 149.8	− 89.87	− 168.6	− 58.83	177.1	− 27
	C 相	模值 /A	19.93	2 841	2 857	3 248	24.04	25.86	2 332
		相角（°）	− 135.1	29.64	86.77	69.99	− 126.5	− 164	56.88
牵引侧电压	A 相	模值 /kV	45.39	63.83	21.19	16.46	11.91	73.96	76.61
		相角（°）	− 35.38	1.195	34.83	− 43.95	− 57.85	14.16	− 11.05
	B 相	模值 /kV	20.51	44.96	64.11	16.18	77.55	11.9	72.97
		相角（°）	− 65.99	− 170.1	− 124.6	185.3	− 126.6	176.9	− 106.6
	C 相	模值 /kV	63.9	20.56	44.9	13.6	73.15	76.53	11.73
		相角（°）	135.2	161.8	64.98	71.73	138.9	108.8	57.16
牵引侧电流	A 相	模值 /A	245.4	113.2	123.8	245	102.6	96.36	6.381
		相角（°）	− 19.49	24.44	82.48	− 24.47	− 63.69	− 10.061	− 108.2
	B 相	模值 /A	245.4	113.2	123.8	245	102.6	96.36	6.381
		相角（°）	160.5	− 155.6	82.48	155.5	116.3	169.9	71.8
	C 相	模值 /A	0	0	0	0	0	0	0
		相角（°）	0	0	0	0	0	0	0

方向保护和距离保护均不能启动。但牵引侧B相电压为7.129 kV，远低于110 kV的额定相电压63.5 kV，故低电压保护可以保护跳闸。同时牵引侧A相、C相电压较额定相电压63.5 kV升高超过10%。可以利用B相低电压，A相、C相电压没有降低来判断B相是否故障。同理，对于A相短路接地情况，牵引侧电流与接触网机车再生制动完全一致。仍然只能利用A相低电压，B相、C相电压升高来判断A相是否故障。

5）三相短路时，牵引侧电流与接触网机车取流完全一致。只能利用A相、B相、C相三相低电压完成故障判断。

6）AB相间短路时，牵引侧电流与接触网机车再生制动完全一致。牵引侧A相、B相低电压。

7）BC相间短路时，牵引侧电流与接触网机车取流完全一致。牵引侧B相、C相低电压。

8）AC相间短路时，牵引侧电流与接触网机车再生制动完全一致。牵引侧A相、C相低电压。

综上，组群贯通供电系统牵引所电源在牵引所侧建议的继电保护配置为：

1）进线安装纵联差动保护。

2）如果无法安装纵联差动保护，则应配置低电压启动的A相、B相功率方向保护。其中，A相功率参考正方向由牵引变压器指向进线；B相功率方向参考正方向由进线指向牵引变压器。

3　牵引变电所装有同相供电补偿装置

上述双边贯通供电时，牵引负荷只接在进线的AB相间，破坏三相输电线路的对称性，此时需要在牵引变电所安装同相供电补偿装置，如图12所示，对牵引变电所的负序、谐波和无功功率进行综合补偿。

此时，进线C相不再悬空。同相供电装置主要由大功率的电力电子器件构成，其开断时间在微秒级，继电保护动作时间一般在20 ms以上，当出现过电压、低电压和过电流时，同相供电装置控制器将会快速封锁控制脉冲，所以不考虑同相供电装置对短路电流和电压的影响。同相供电装置高压匹配变压器通过其高压侧绕组将进线的C相连接起来，此时当进线短路时，C相也会有短路电流。当C相短路接地时，其电流方向由牵引变压器流向线路；当B相或A相短路接地时，其电流方向由线路流向牵引变压器；当相间短路时，其电流流向更加复杂；所以C相牵引侧的功率方向保护不会发生作用，能够起作用的仍然是差动电流保护和低电压保护。

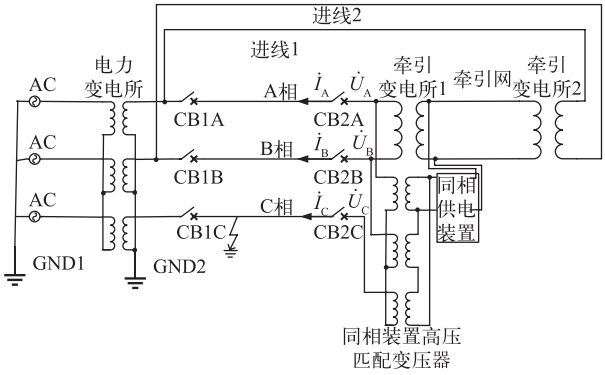

图 12　牵引变电所装有同相供电补偿装置示意图

Fig. 12 Schematic diagram of traction substation equipped with co-phase power supply compensation device

考虑到同相供电补偿一般只需要将负序、谐波等补偿到国家电能质量标准要求范围内即可，所以高压匹配变压器容量一般比牵引变压器要小，只有牵引变压器的1/4或更小；而且短路电流要经过同相供电装置高压匹配变压器的两相绕组提供，这使得C相牵引侧短路电流非常小，可以忽略进线C相牵引侧短路电流，前文的分析对于牵引变电所装有同相供电补偿装置仍然适用。

4　结束语

通过对组群贯通供电方式牵引变电所进线各种故障进行分析，得到结论如下：

1）对于进线牵引所侧来说，当发生各种类型短路故障时，电网侧提供的短路电流受到牵引变压器限制，通过接触网绕送的短路电流受到接触网阻抗限制，牵引侧的短路电流一般较小。

2）进线发生各种单相和相间短路，差动保护均能启动。

3）如果无法安装纵联差动保护，则应配置低电压启动的A相、B相功率方向保护。其中，A相功率参考正方向由牵引变压器指向进线，B相功率方向参考正方向由进线指向牵引变压器。

参考文献

[1] 李群湛，贺建闽．牵引供电系统分析[M]．3版．成都：西南交通大学出版社，2012．

[2] 李群湛．我国高速铁路牵引供电发展的若干关键技术问题[J]．铁道学报，2010，32(4)：119-124．

[3] 李群湛，王辉，黄文勋，等．电气化铁路牵引变电所群贯通供电系统及其关键技术[J]．电工技术学报，2021，36(5)：1064-1074．

[4] 李群湛．论新一代牵引供电系统及其关键技术[J]．西南交通大学学报，2014，49(4)：559-568．

[5] 张丽艳，李鑫，梁世文，等．高速铁路牵引供电系统双边供电循环功率降低措施[J]．中国铁道科学，2020，41(5)：127-135．

[6] 马庆安．高速铁路AT供电若干问题的研究[D]．成都：西南交通大学，2013．

[7] 余涵．电气化铁路双边供电及其对电力系统的影响与对策研究[D]．成都：西南交通大学，2017．

[8] 智慧，袁勇，李剑，等．双边供电模式下高速铁路AT供电系统供电能力计算与分析[J]．中国铁路，2017(12)：66-71．

作者简介

靳松（1991—），男，工程师，硕士，现从事轨道交通牵引供变电专业的工程设计与研究工作。

（收稿日期：2024-07-19）