

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.04.014

电网故障下晶闸管控制型移相器穿越策略

李鹏, 林金娇, 陈实

(国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要:晶闸管控制型移相器(thyristor controlled phase shifting transformer, TCPST)是一种新型潮流控制设备,其串并联耦合拓扑及接入电网方式特殊,须考虑其在电网故障情况下的处理策略。文中基于TCPST的结构及原理,分析电网故障冲击对TCPST的影响,明确TCPST内部故障电流分布和过电流、过励磁特征。在此基础上,提出TCPST应对电网故障冲击的穿越控制策略,构建TCPST接入电网的故障状态识别判据和控制时序,通过电气特征量对TCPST区内外故障和电网故障恢复状态进行识别,实现TCPST故障退出时序及自动重启,通过TCPST暂时退出保护电网严重故障情况下的设备安全。对文中所提TCPST故障穿越策略开展仿真验证,结果表明该策略可实现TCPST在电网故障时的可靠穿越,有效提升TCPST可用率,保证其潮流调节作用得以充分发挥。

关键词:晶闸管控制型移相器(TCPST);晶闸管控制开关;旁路开关;故障穿越;自动重启;故障恢复

中图分类号:TM762

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2025)04-0128-10

0 引言

在我国新型电力系统建设中,电网规模不断增大,能源清洁低碳发展,受限于发电资源分布、区域用电需求不均衡等诸多因素,电网潮流分布不均普遍存在,负荷密集地区电网供电需求不断提高和电网建设难度持续增大之间的矛盾日趋突出,降低了电力系统运行的经济性^[1-4]。柔性交流输电系统(flexible AC transmission system, FACTS)是解决这类问题的有效途径^[5]。

FACTS装置主要分为串联型、并联型和综合型。其中,统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)作为最典型的综合型FACTS装置,在潮流调节方面具有良好的效果,但其造价成本较大且占地面积需求较大^[6-7]。相比之下,可控移相器技术具有经济性好、占地少、结构简单、运维简单等优势,应用场景更广泛。国内外大量研究表明,晶闸管控制型移相器(thyristor controlled phase shifting transformer, TCPST)不仅具有传统机械式移相变压器调节电网潮流、改善系统潮流分布的功能,而且具备快速调节、快速响应的特性。

目前,有关TCPST的研究主要集中于原理建模^[8-12]、应用分析^[13-20]等方面,针对电网故障下TCPST控制策略的研究较少,大多聚焦于基于TCPST的短路电流抑制技术^[21-25],TCPST的故障穿越策略研究仍有待开展。文献[21]提出一种利用TCPST自身阻抗的短路故障电流限制策略,通过在故障时调节TCPST移相角、改变TCPST等值阻抗等实现故

障电流的抑制,但未考虑TCPST本体对故障电流的耐受能力,且发生严重电网故障时,若利用TCPST自身阻抗来限制故障电流以实现故障穿越,可能对TCPST内部元件造成损害。文献[24-25]提出利用TCPST串联变压器励磁阻抗抑制系统短路电流,通过闭锁晶闸管控制开关(thyristor control switch, TCS)电路,使串联变压器副边绕组开路,导致TCPST等效为串联变压器的励磁阻抗,并利用该励磁阻抗抑制短路电流。闭锁TCS电路会导致串联变压器快速进入过励磁状态,造成铁心过热,对TCPST设备要求较高,设备选型设计难度及成本增加。

TCPST的核心元件包括并联变压器(记为ET)、串联变压器(记为BT)和TCS。由于TCPST拓扑和接入电网方式的特殊性,电网发生故障时,故障电气耦合可能对TCPST产生较大冲击,对设备造成危害,因此需要开展TCPST受电网故障冲击影响及防护策略的研究,保证设备接入电网的安全运行及可用率。已有大量文献对UPFC的故障穿越策略进行研究^[26-29],文献[29]针对UPFC的接入电网故障处理,提出一种快速旁路技术,当电网发生危及UPFC运行的故障时,UPFC通过自身的控制保护系统,闭锁换流阀,串联变侧通过快速旁路开关(bypass switch, BPS)和机械BPS配合进行故障隔离,并设计一种自动重启策略恢复UPFC运行。TCPST的结构、原理及元件等均不同于UPFC,须针对TCPST制定故障穿越策略,已有的TCPST短路电流抑制技术及UPFC故障穿越策略研究成果可为TCPST故障穿越策略研究提供参考。

收稿日期:2024-10-17;修回日期:2024-12-23

文中在对 TCPST 工作原理进行分析的基础上, 从 TCPST 内故障电流分布和过电流、过励磁承受能力方面, 对 TCPST 受电网故障的影响进行分析; 结合 TCPST 故障穿越要求和 TCPST 接入电网方案, 提出 TCPST 故障穿越控制策略; 基于 PSCAD/EMTDC 平台, 搭建包含 TCPST 的环网系统作为故障穿越仿真模型, 对文中所提控制策略的有效性进行仿真验证。

1 TCPST 工作原理

1.1 TCPST 拓扑

TCPST 由 ET、BT 以及 TCS 电路组成, ET 包括原边绕组 E1 和 3 个副边绕组 E2、E3 及 E4, BT 包括 2 个原边绕组 B1、B2 和副边绕组 B3, TCPST 拓扑如图 1 所示。

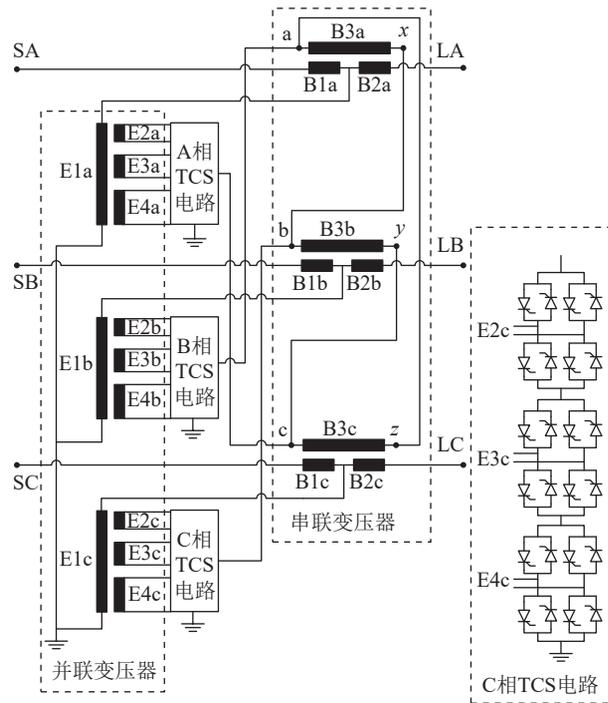


图 1 TCPST 拓扑
Fig.1 Topology of TCPST

图 1 中, BT 原边 2 个绕组匝比为 1 : 1, ET 副边 3 个绕组匝比一般为 1 : 3 : 9。每相的 TCS 电路由 3 组反并联晶闸管对构成的 H 桥串联组成, ET 副边和 BT 副边通过 TCS 电路连接, 通过 H 桥的开通关断实现 ET 对应绕组正投入、负投入和退出。例如, 1 号—4 号晶闸管构成的 H 桥控制 E2 绕组接入方式, 1 号、4 号晶闸管导通时 E2 正接入, 2 号、3 号晶闸管导通时 E2 负接入, 1 号、2 号或 3 号、4 号晶闸管导通时 E2 不接入。通过控制 ET 副边绕组接入方式形成 27 种工作模式, 即 27 个挡位, 见表 1, 每种工作模式表示对应挡位及一定的

移相角, 通过改变移相角, 实现线路功率的调节。表 1 中, U_{E2} 、 U_{E3} 、 U_{E4} 分别为 ET 副边绕组 E2、E3、E4 的输出电压。

表 1 TCPST 工作模式
Table 1 Operating modes of TCPST

挡位	E2绕组 接入方式	E3绕组 接入方式	E4绕组 接入方式	ET二次侧 输出电压
0	×	×	×	0
1(-1)	+(-)	×	×	$\pm U_{E2}$
2(-2)	-(+)	+(-)	×	$\pm(-U_{E2}+U_{E3})$
3(-3)	×	+(-)	×	$\pm(U_{E3})$
4(-4)	+(-)	+(-)	×	$\pm(U_{E2}+U_{E3})$
5(-5)	-(+)	-(+)	+(-)	$\pm(-U_{E2}-U_{E3}+U_{E4})$
6(-6)	×	-(+)	+(-)	$\pm(-U_{E3}+U_{E4})$
7(-7)	+(-)	-(+)	+(-)	$\pm(U_{E2}-U_{E3}+U_{E4})$
8(-8)	-(+)	×	+(-)	$\pm(-U_{E2}+U_{E4})$
9(-9)	×	×	+(-)	$\pm(U_{E4})$
10(-10)	+(-)	×	+(-)	$\pm(U_{E2}+U_{E4})$
11(-11)	-(+)	+(-)	+(-)	$\pm(-U_{E2}+U_{E3}+U_{E4})$
12(-12)	×	+(-)	+(-)	$\pm(U_{E3}+U_{E4})$
13(-13)	+(-)	+(-)	+(-)	$\pm(U_{E2}+U_{E3}+U_{E4})$

注: “+”代表正接入, “-”代表负接入, “×”代表不接入。

1.2 TCPST 等值电路

单相 TCPST 电路如图 2 所示。TCPST 可等效为一具有复变比的理想变压器与等值阻抗串联, 其等值电路如图 3 所示。通过 TCPST 等值电路内部各电气量的数学关系进行推导, 可得到 TCPST 移相角和等值阻抗, 如式(1)、式(2)所示^[11-12]。图 3 中, \dot{U}_M 、 \dot{I}_M 分别为线路 M 端电压、电流相量; $\dot{U}_{M'}$ 、 $\dot{I}_{M'}$ 分别为 TCPST 末端电压、电流相量; Z_{eq} 为 TCPST 等效电阻。

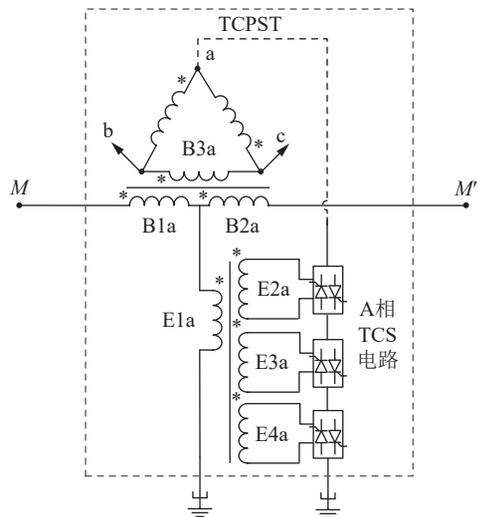


图 2 TCPST 单相电路
Fig.2 Single phase circuit of TCPST

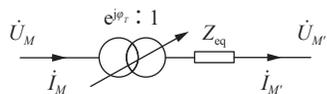


图3 TCPST 单相等值电路

Fig.3 Single phase equivalent circuit of TCPST

$$\varphi_T = 2\arctan\left(\frac{\sqrt{3}}{n_E n_B}\right) = 2\arctan\left(\frac{\sqrt{3}N_{B2}N_T}{N_{B3}N_{E1}}T\right) \quad (1)$$

$$\begin{cases} Z_{eq(T \neq 0)} = 2Z_{B1} + \frac{12\left(Z_{E1} + n_E^2 Z_T + \frac{1}{3}n_E^2 Z_{B3}\right)}{(n_E n_B)^2 + 3} \\ Z_{eq(T=0)} = 2Z_{B1} + \frac{4Z_{B3}}{n_B^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中： φ_T 为TCPST在T挡位的移相角； N_{B1} 、 N_{B2} 、 N_{B3} 分别为BT原边绕组B1和B2、副边绕组B3的匝数， $N_{B1}=N_{B2}$ ； $n_B=N_{B3}/N_{B1}$ ，为B3绕组与B1绕组的匝数比； N_{E1} 为ET原边绕组E1的匝数； N_T 为ET副边单位极差电压对应绕组(图1中E2绕组)匝数； $n_E=N_{E1}/(N_T T)$ ，为T挡位下ET原副边变比， T 为 $[-13, 13]$ 间的整数； Z_{B1} 、 Z_{B3} 分别为B1、B3绕组阻抗，且B1绕组和B2绕组阻抗一致； Z_{E1} 为E1绕组阻抗； Z_T 为ET副边绕组阻抗。

1.3 TCPST 潮流控制原理

将TCPST等值电路接入输电线路中，如图4所示。图4中， Z_L 为线路阻抗； U_M 、 U_N 为线路两端电压幅值； $U_{M'}$ 为TCPST末端电压幅值； φ_M 、 φ_N 为线路两端电压相位； $\varphi_{M'}$ 为TCPST末端电压相位且 $\varphi_{M'}=\varphi_M+\varphi_T$ 。忽略电阻，TCPST接入后，线路的有功功率如式(3)所示，其中 X_L 为线路等效电抗； X_{eq} 为TCPST等效电抗。TCPST通过改变移相角 φ_T 实现线路有功功率的调节。

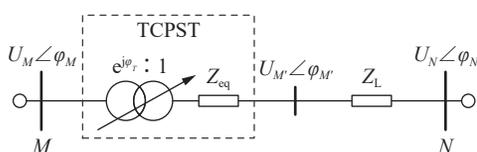


图4 TCPST 工作原理示意

Fig.4 The working principle of TCPST

$$P = \frac{U_M U_N}{X_L + X_{eq}} \sin(\varphi_M + \varphi_T - \varphi_N) \quad (3)$$

2 电网故障对TCPST影响

电网故障时，将对TCPST内部元件造成影响。由于TCPST接入电网方式的特殊性和内部耦合的复杂性，电网故障对TCPST的影响不仅与其各部件过电压、过电流耐受能力有关，还与TCPST工作模式相关，不同工作模式下，各个TCPST的故障

电流不同。

2.1 电网故障下TCPST故障电流分布

电网发生故障时，TCPST的工作模式包括：TCS电路处于非0挡位、TCS电路处于0挡位和TCS电路处于闭锁状态。各工作模式下的故障电流在TCPST内部具有不同的分布特性。

(1) TCS电路处于非0挡位。当接有TCPST的线路发生故障时，若此时TCS处于非0挡位，则故障电流会通过BT原边绕组并耦合至BT副边绕组，而BT副边绕组与ET副边绕组通过TCS电路相连接，因此故障电流流入ET。故障电流分布如图5(a)所示。其中， I_f 为故障电流； f 为故障点。

(2) TCS电路处于0挡位。当TCS电路处于0挡位时，BT副边相当于短路，而ET副边相当于开路，TCPST等效为BT漏电抗串入线路。此时，若线路发生故障，故障电流会直接流过BT原边绕组，并耦合至BT副边绕组和TCS电路。故障电流分布如图5(b)所示。

(3) TCS电路闭锁。电网故障时，TCPST旁路开关未合闸情况下，若TCS电路闭锁，ET副边绕组和BT副边绕组均相当于开路，BT等效为励磁阻抗串入电路中，BT原边绕组将持续流过系统的短路电流，BT将处于严重的过励磁状态，此时BT相当于空心电抗(空心电抗比漏抗大)串入线路，起到一定故障电流抑制作用。故障电流分布如图5(c)所示。

2.2 电网故障下TCPST过电流耐受能力

电网发生故障时，BT原边绕组会流过与线路短路电流相等的故障电流，因此要求BT绕组具备一定的过电流耐受能力。

对于TCPST过电流耐受能力分析，考虑最严重情况，即系统发生故障时，TCS电路处于0挡位。此时，BT原边绕组将持续流过系统短路故障电流直至故障切除。根据分析，TCPST未接入线路前，系统短路电流为：

$$I_f = \frac{U_s}{\sqrt{3}Z_s} \quad (4)$$

式中： Z_s 为系统短路阻抗； U_s 为系统额定电压。

根据TCPST的技术参数可知，BT的短路阻抗为：

$$Z_{BT} = \frac{U_k U_N^2}{100S_N} \quad (5)$$

式中： U_k 为BT原边绕组短路电压百分比； U_N 为BT原边绕组额定电压； S_N 为BT额定容量。

根据2.1节分析，TCS在0挡位下，TCPST等效为BT原边绕组漏抗串入线路，此时若线路发生故

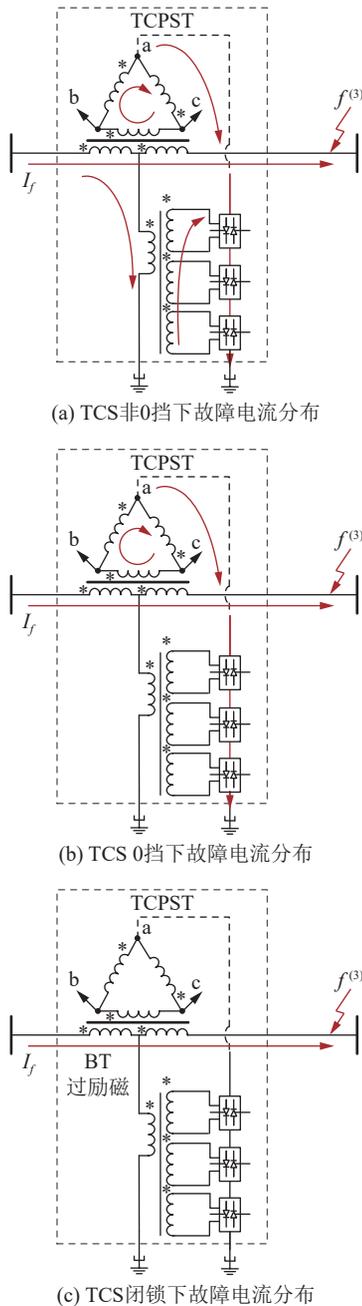


图5 TCPST各个工作模式下故障电流分布
Fig.5 Fault current distribution under each operating mode of TCPST

障, 系统短路电流为:

$$I_f = \frac{U_s}{\sqrt{3}(Z_s + Z_{BT})} \quad (6)$$

由式(6)可得流过BT原边绕组最严重的故障电流, 持续时间按线路主保护动作、断路器跳闸切除线路考虑(一般取100ms)。

由于TCS处于0挡位下, 故障电流会耦合到BT副边并进一步流入TCS电路, TCS将承受较大的电流, 但电压很小。以TCPST处于0挡位工作时, 线路发生三相接地短路故障为例, 线路故障电流为 I_f , 则由TCPST内部电气量关系可得T挡位下

流过TCS电路的故障电流 I_{Tf} 为:

$$I_{Tf} = \left| j \frac{2\sqrt{3}}{n_B} \dot{I}_{B1} \right| = \frac{2\sqrt{3}}{n_B} I_f \quad (7)$$

式中: \dot{I}_{B1} 为流过BT原边绕组B1的电流相量。

由式(7)可知, 流过TCS电路的故障电流 I_{Tf} 与线路故障电流 I_f 及BT变比 n_B 有关, 因此在晶闸管选型时须考虑过电流耐受能力。

2.3 电网故障下TCPST过励磁耐受能力

根据2.1节分析, 在电网发生故障时, BT过励磁发生于TCS闭锁状态下, 此时, BT副边绕组相当于开路, BT以励磁阻抗的形式串入线路中。由于BT原边绕组额定电压较低(一般远小于线路额定电压), 当线路发生接地故障时, BT原边绕组电压将快速上升至接近电网电压, BT原边串联绕组承受数倍于额定电压的过电压, 同时造成BT进入过励磁状态, 相当于空心电抗串入线路中, BT原边绕组持续流过故障电流, 但空心电抗会起到一定的故障电流抑制作用。

根据BT的主要技术参数, B1或B2绕组的空心电抗为 Z_b 。根据BT原边绕组空心电抗与系统电抗的分压关系, 可得到串联变压器原边绕组端电压 U_B 为:

$$U_B = \left| \frac{2Z_b}{2Z_b + Z_s} \right| \frac{U_s}{\sqrt{3}} \quad (8)$$

相应的原边绕组故障电流为:

$$I_f = \frac{U_s}{\sqrt{3}(2Z_s + Z_b)} \quad (9)$$

持续时间按线路主保护动作、断路器跳闸切除线路考虑(一般取100ms)。由式(8)、式(9)可知, TCS闭锁可降低故障电流, 但严重过励磁会引起BT铁心发热、振动等一系列问题, 因此故障穿越策略中须考虑过电压、过励磁耐受要求。

3 TCPST故障穿越控制策略

当TCPST接入电网发生故障时, BT和TCS可能受到过电压、过电流冲击, 特别是接有TCPST的近区严重故障时, 系统短路电流会流过BT原边绕组, 并耦合至TCS和ET, 当TCPST无法有效抑制短路电流时, 必须迅速采取措施保护设备安全, 同时兼顾TCPST的可用性和可靠性。

3.1 TCPST故障穿越基本要求

电网故障时, TCPST的故障穿越控制策略应根据设备承受能力和电网需求制定, 要求如下:

(1) 对于电网故障引起的过电流或过电压, 不超过TCPST的承受能力时, 应保持TCPST处于运

行状态,在电网故障期间可闭锁 TCPST 挡位调节,或采用一定的控制策略抑制电网故障电流。

(2) 对于电网故障引起的过电流或过电压,超过 TCPST 的承受能力时,应及时退出 TCPST,并在故障清除及并网线路恢复正常后控制 TCPST 自动投入,按照设定的策略进行调节。文中主要针对这一情况进行 TCPST 的电网故障穿越策略研究。

采用图 6 所示典型 TCPST 接入方案分析 TCPST 的电网故障穿越策略。图 6 中, U_S 、 U_L 分别为电源侧电压和负载侧电压; DL_S 、 DL_R 为线路断路器; BPS 为 TCPST 旁路开关, TCPST 可采用刀闸或断路器与线路连接; I_S 、 I_L 分别为电源侧电流和负载侧电流; I_{B1} 、 I_{B2} 、 I_{B3} 分别为流过 B1、B2、B3 的电流。当线路发生故障时,可通过调节 TCS 挡位,并配合 BPS 的操作,实现 TCPST 故障穿越。

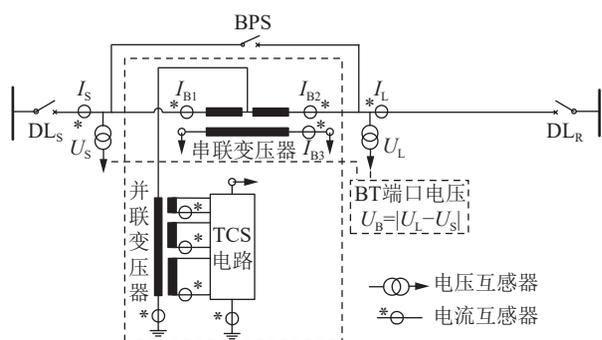


图 6 TCPST 接入电网方案
Fig.6 Scheme of TCPST access to grid

3.2 TCPST 故障穿越控制策略

根据电网故障下 TCPST 故障特征分析,结合 TCPST 故障穿越要求及接入电网方案,提出电网故障下 TCPST 穿越策略。基本思想是:在电网故障危及 TCPST 设备安全时,通过 TCPST 挡位、BPS 与电网故障清除配合,实现 TCPST 故障穿越;通过快速故障识别及 BPS 配合暂时退出 TCPST,保证设备安全;进行故障区域识别及电网恢复状态识别,在电网恢复正常运行后,重新自动启动 TCPST,发挥电网故障后调节作用。故障穿越策略关键点如下:

(1) TCPST 通过自身控制保护与线路保护相配合,在系统故障引起 TCPST 过电压或过电流时,采用故障退出策略将 TCPST 迅速旁路,并处于暂时退出状态。

(2) 采用区内外故障状态识别策略,识别故障发生在 TCPST 设备区域还是外部电网区域,若故障发生在外部电网区域则允许 TCPST 执行重启逻辑。

(3) 经过设定时间后(考虑线路重合闸时间配

合),通过线路电压、电流以及开关位置等信息综合判断线路是否正常运行,若检测到线路正常运行,则自动重启 TCPST 投入运行。

基于上述 TCPST 故障穿越策略,设计图 7 所示故障穿越流程,主要包含 TCPST 故障退出策略和 TCPST 自动重启控制策略。

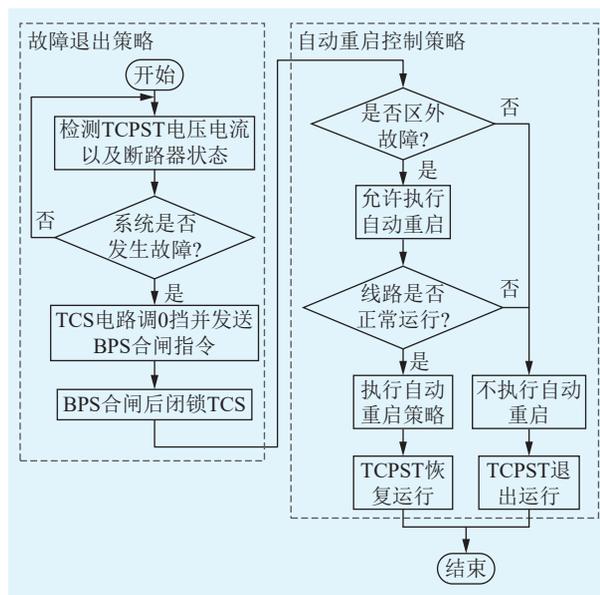


图 7 电网故障下的 TCPST 穿越控制策略
Fig.7 Control strategies of TCPST under grid faults

3.2.1 TCPST 故障退出策略

安装 TCPST 的线路或其邻近电网发生故障时,对于 TCPST 均为区外故障,但由于 TCPST 的串、并联单元和线路的耦合关系较强,特别是 TCPST 的串联单元受到电网侧故障的影响较大,因此须采用故障穿越控制策略保护 TCPST 安全。

由图 7 可知,当电网故障未超过 TCPST 承受能力时, TCPST 可保持正常运行状态。当电网发生严重故障引起 TCPST 端口过电压或过电流时,快速将 TCPST 调至 0 挡位,通过 TCS 在 0 挡位触发导通实现,此时 TCS 起到类似于 BT 副边绕组 BPS 的作用, BT 副边绕组短路,等效漏抗串接入线路。进一步,为防止 BT 和 TCS 电路长时间流过故障电流,触发 TCS 在 0 挡位导通的同时,发送 BPS 合闸命令,在 BPS 合闸后及时将 TCS 电路闭锁。

通过 TCS 和 BPS 的配合,在交流系统发生严重故障时,可以保证 TCPST 能够快速、可靠地从电网故障回路中隔离。此外,由图 5(b)可知,电网故障电流耦合至 TCS 电路,若 BPS 合闸时间较长,严重故障时 TCS 晶闸管可能由于长时间流过大电流而受到损伤,在工程应用中,须根据电网短路电流水平选择 TCS 晶闸管参数及 BPS 合闸时间, BPS 合闸时间不超过晶闸管故障电流耐受时间,并根据

晶闸管最严重过电流耐受能力设置 TCS 电路故障电流最长导通时间。

3.2.2 TCPST 自动重启策略

输电线路一般配置有重合闸, 对于瞬时性故障, 如果重合闸成功, 则线路恢复正常运行, 或者相邻其他区域故障清除后系统恢复正常运行, 这种情况下如果 TCPST 永久退出运行, 无法发挥其电网故障后的潮流调节作用, 降低了利用率。因此, 针对线路瞬时故障以及邻近线路的故障, 进一步优化 TCPST 故障穿越策略, 提出 TCPST 自动重启控制策略, 提高系统整体运行的可靠性。

由图 7 可知, 当 TCPST 完成故障穿越后, 进一步判断故障位置, 若判断为区内故障, 即 TCPST 本体故障, 则永久性停运 TCPST, 后续根据故障处理情况手动恢复 TCPST 运行。若判断为区外故障, 则暂时性闭锁旁路 TCPST, 允许 TCPST 执行自动重启。随后, 经过一定的延时时间 T_{cq} (延时大于重合闸时间, 并留有一定裕度, 结合工程经验可取 2~5 s), 判别线路是否恢复正常运行, 若线路恢复正常运行, 则执行 TCPST 自动重启。具体为: 先 0 挡位解锁 TCS, 然后分开 BPS, 并按控制目标进行 TCPST 挡位调节。若线路未恢复正常运行, 则永久停运 TCPST, 不再执行 TCPST 自动重启, 后续根据电网故障处理情况手动恢复 TCPST 运行。

整体故障穿越过程的时序如图 8 所示, 由上述 TCPST 故障穿越策略可知, 电网故障时 TCPST 区内外故障识别、电网故障恢复识别及 TCPST 自动重启是实现故障穿越的关键。

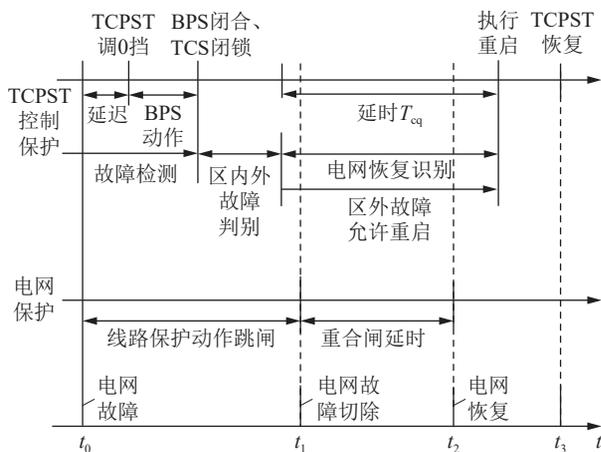


图 8 整体故障穿越控制时序示意

Fig.8 Schematic diagram of time sequence for fault ride-through

3.3 TCPST 区内外故障识别判据

根据 TCPST 自动重启控制策略可知, 其关键点在于如何准确区分 TCPST 区内外故障。对此, 针

对 TCPST 在电网故障下运行状态和保护动作情况进行分析, 有以下特点:

(1) 系统发生严重故障导致 TCPST 端口电压或电流超过其承受能力时, TCPST 串联变压器会发生绕组过流或原边串联绕组端口过压, 此时快速将 TCPST 退出运行, 其他 TCPST 保护将不再动作。

(2) 对于 TCPST 本体的内部故障, 配置多种保护功能, 内部每个区域都配置有差动保护且保护范围相互交叉, 因此 TCPST 内部故障时多个保护同时动作。

(3) 安装 TCPST 的线路的保护动作信号可作为 TCPST 区外故障的判据。当线路发生故障时, 线路保护装置发送动作信号给 TCPST 控制保护装置。

经上述分析, 可以将“仅有 TCPST 串联变压器绕组过流保护或串联绕组端口过压保护动作或接收到线路保护动作信号”作为 TCPST 区外故障的判据。进一步, 为提高对区外故障判断的准确性, 引入线路电压状态作为辅助判据, 在交流系统发生故障时, TCPST 接入线路的电压会出现异常, 其异常特性表现在电压的不同序分量上, 如正序电压较低、零序电压较大或负序电压较大。综上, 结合图 6 所示 TCPST 接入电网方案, BT 绕组过电流判据与串联绕组端口过电压判据见式(11)中 P_1 、 P_2 , 辅助电压判据见式(11)中 P_3 , 共同构成 TCPST 区外故障识别判据 P_{nt} , 并结合线路保护动作条件、TCPST 其他保护不动作条件构成 TCPST 区内外故障判别逻辑, 如图 9 所示。

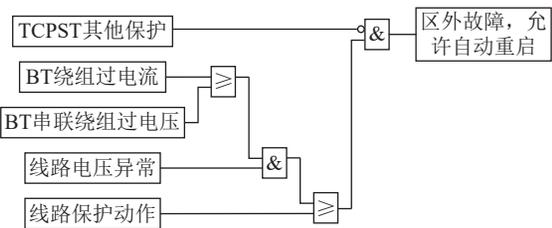


图 9 区内外故障判别逻辑

Fig.9 Logic for discriminating between internal and external faults

$$P_{nt} = (P_1|P_2) \& P_3 \quad (10)$$

$$\begin{cases} P_1 = (|I_{B1}| > T_{I1}) | (|I_{B2}| > T_{I2}) | (|I_{B3}| > T_{I3}) \\ P_2 = |U_B| > T_u \\ P_3 = ((U_{S1} < T_{u1}) | (U_{S2} > T_{u2}) | (U_{S0} > T_{u0})) | \\ ((U_{L1} < T_{u1}) | (U_{L2} > T_{u2}) | (U_{L0} > T_{u0})) \end{cases} \quad (11)$$

式中: T_u 为电压阈值; U_S 、 U_L 、 T_u 的下标 1、2、0 分别表示相应量的正、负、零序分量; T_{I1} 、 T_{I2} 、 T_{I3} 分别为 B1、B2、B3 电流的阈值。

当满足图 9 所示判别逻辑时, 判断为区外故

障,允许执行 TCPST 自动重启;若不满足上述判别逻辑,则判断为 TCPST 内部故障,不允许执行自动重启。

3.4 电网故障恢复识别判据

电网故障导致 TCPST 临时退出,在执行 TCPST 重新投入运行前,须判断电网是否恢复正常运行,此时可通过线路电压正常判据(正序、零序和负序电压均在正常范围内)和线路电流满足限值以及线路断路器合位进行判断,判据见式(12)中 P_{nor} ,构造电网故障恢复识别判据逻辑,如图 10 所示。

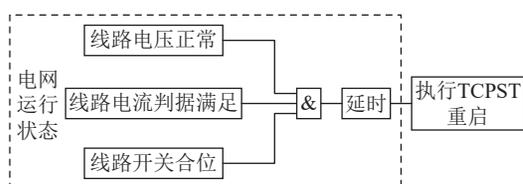


图 10 故障恢复判别逻辑

Fig.10 Fault recovery decision logic

$$P_{nor} = (P_1 \& P_2) \& \text{线路开关合位} \quad (12)$$

$$\begin{cases} P_1 = (|I_L| > T_1) \\ P_2 = ((U_{S1} > T_{u1}) \& (U_{S2} < T_{u2}) \& (U_{S0} < T_{u0})) \& \\ ((U_{L1} > T_{u1}) \& (U_{L2} < T_{u2}) \& (U_{L0} < T_{u0})) \end{cases} \quad (13)$$

式中: T_1 为负载侧电流阈值。

当满足图 10 所示判别逻辑时,判断为线路恢复正常运行, TCPST 具备重启动条件,执行 TCPST 自动重启控制策略。

4 仿真实验

选取图 11 所示典型环网系统作为对象,在 PSCAD/EMTDC 平台下搭建 TCPST 故障穿越仿真模型,对文中所提 TCPST 穿越策略进行仿真实验。其中, S_1 — S_3 为电源; LD_1 — LD_3 为负荷; L_1 — L_6 为线路; T_1 — T_3 为主变。TCPST 接入线路 L_1 。设定系统额定电压等级为 220 kV, TCPST 主要参数见表 2。

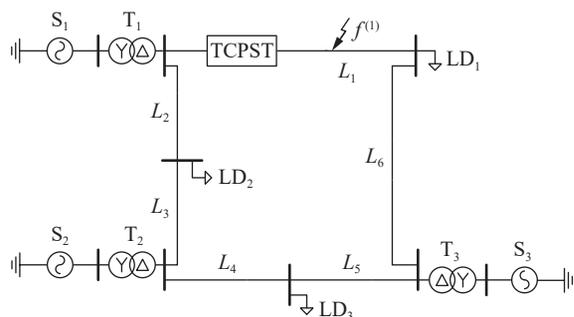


图 11 TCPST 故障穿越仿真模型

Fig.11 Simulation model of TCPST fault ride through

设定接有 TCPST 的线路在 3.0 s 时发生瞬

表 2 TCPST 仿真参数

Table 2 Simulation parameters of TCPST

ET参数	数值	BT参数	数值
额定容量/MW	150	额定容量/MW	150
E1额定电压/kV	220	B1额定电压/kV	30
E2额定电压/kV	3	B2额定电压/kV	30
E3额定电压/kV	9	B3额定电压/kV	36
E4额定电压/kV	27	绕组漏抗/p.u.	0.11
绕组漏抗/p.u.	0.08		

性 A 相接地故障,故障持续 0.2 s,故障前 TCPST 处于 10 挡。采用 TCPST 故障穿越控制策略后, TCS 电路调 0 挡位,并发送 BPS 合闸指令。以故障时刻(3.0 s)为零时刻, 10 ms 时 TCS 调 0 挡位, 35 ms 时 BPS 合闸,并闭锁 TCS; 80 ms 时线路断路器动作,切除线路,并判别 TCPST 区内外故障。为了画图描述清晰,仿真中设置重合闸延时为 0.3 s,即故障后约 0.38 s 时刻线路重合闸,并对线路正常运行状态进行判别,判别线路正常运行后, 0 挡解锁 TCS 电路,并重新投入 TCPST 进行调节。整个过程中, TCPST、BPS 和线路的有功功率变化如图 12 所示。

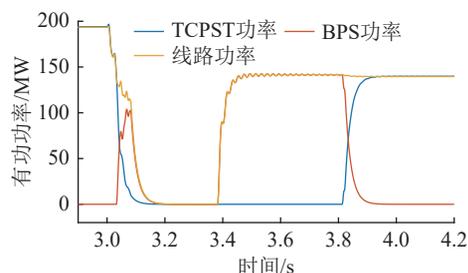


图 12 TCPST 功率及旁路功率

Fig.12 TCPST power and bypass power

为分析电网故障时 TCPST 故障穿越策略的有效性,将不采用控制策略和采用控制策略下,故障前后的 TCPST 入端电流和 TCS 电路电流进行对比分析,如图 13 和图 14 所示。对于不采用控制策略的故障穿越仿真,设定 TCPST 在故障过程中保持挡位不变, 3.08 s 时线路断路器动作切除故障, 3.38 s 线路重合闸。

由仿真结果可见,采用文中所提控制策略后, TCPST 在单相接地故障下, BT 在故障发生后被快速旁路,且 TCS 通过及时的调挡和闭锁,在保障 BT 不发生過电压的同时,尽可能地减少了 TCPST 故障流持续时间,有助于保护 TCPST 组部件的安全。电网故障后, TCPST 暂时性地退出运行,线路恢复正常后, TCPST 及时重启并进行潮流调节,提高了 TCPST 的利用率。

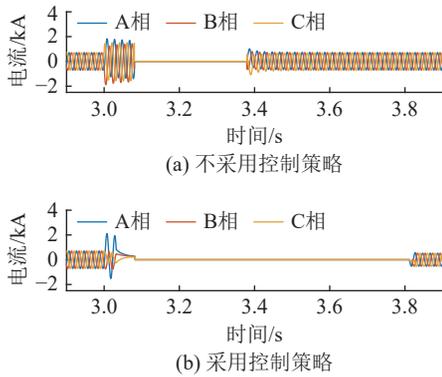


图 13 TCPST 电流对比

Fig.13 Comparison of TCPST currents

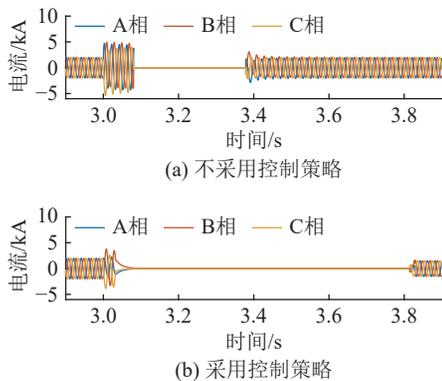


图 14 TCS 电路电流对比

Fig.14 Comparison of TCS circuit currents

5 结论

针对 TCPST 应对电网故障冲击的问题,文中分析各种工况下 TCPST 内部各元件受电网故障的影响,给出 TCPST 故障穿越要求,提出电网故障下的 TCPST 穿越策略,并通过仿真对所提策略的有效性进行模拟验证。结果表明:

(1) 利用 TCPST 及其接入线路的就地电气信息,构建区内外故障识别、电网状态恢复识别及自动重启策略及判据,具有良好的工程可实施性。

(2) 所提 TCPST 故障穿越控制策略通过调节 TCS 电路挡位,并配合断路器及 BPS 操作,实现 TCPST 电网故障下的故障穿越,可有效保护 TCPST 内部各元件。

(3) 所提 TCPST 自动重启控制策略可实现故障区域识别及电网恢复状态识别,在电网恢复正常运行后,快速重新自动启动 TCPST,提升设备可用率,保证 TCPST 潮流调节作用可以得到充分利用。

致谢

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目(J2022162)资助,谨此致谢!

参考文献:

[1] 汤奕,易俊,薛峰. “双碳”目标下的新型电力系统规划与运行

[J]. 全球能源互联网, 2024, 7(3): 241-242.

TANG Yi, YI Jun, XUE Feng. Planning and operation of new power system under the goal of "dual carbon"[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2024, 7(3): 241-242.

[2] 张玮,白恺,鲁宗相,等. 特大型新能源基地面临挑战及未来形态演化分析[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(1): 10-25.

ZHANG Wei, BAI Kai, LU Zongxiang, et al. Analysis of the challenges and future morphological evolution of super large-scale renewable energy base[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(1): 10-25.

[3] 张璐. 新型配电系统优化规划与运行控制[J]. 供用电, 2023, 40(1): 1.

ZHANG Lu. Optimal planning and operation control of new distribution system[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(1): 1.

[4] 杨洪明,尹邦哲,孟科,等. 考虑源荷功率矩不确定性的新型互联电力系统省内-省间分布鲁棒协调优化调度[J]. 电力建设, 2023, 44(7): 98-110.

YANG Hongming, YIN Bangzhe, MENG Ke, et al. Distributed robust optimal scheduling of the new interconnected power system with the inter-province and intra-province considering moment uncertainty of source load power[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(7): 98-110.

[5] 王智伟,张振宇,李征,等. 提升高渗透率新能源电网承载能力的 DSSC 优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 179-187.

WANG Zhiwei, ZHANG Zhenyu, LI Zheng, et al. Optimized DSSC configuration to enhance load-carrying capacity of the new energy grid with high permeability[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 179-187.

[6] 魏晓婧. 面向 UPFC 应用的换流器拓扑及控制策略研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.

WEI Xiaojing. Research on converter topology and control strategy for UPFC applications[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.

[7] 刘军伟,梁展弘,刘展志,等. 统一潮流控制器注入电压及串联换流器容量优化计算研究[J]. 南方能源建设, 2023, 10(5): 157-165.

LIU Junwei, LIANG Zhanhong, LIU Zhanzhi, et al. Optimization calculation method of injection voltage and series converter capacity for unified power flow controller[J]. Southern Energy Construction, 2023, 10(5): 157-165.

[8] 李群,张宁宇,高山,等. 电网移相器 RTDS 建模及应用场景分析[J]. 电力工程技术, 2021, 40(2): 53-58.

LI Qun, ZHANG Ningyu, GAO Shan, et al. Modeling and application scenario analysis of power phase shift transformer based on RTDS[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 53-58.

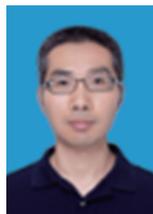
[9] 李晓华,陈镇生,罗一杰,等. 基于全绕组拓扑结构的移相变压器建模及应用[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(12): 101-106.

LI Xiaohua, CHEN Zhensheng, LUO Yijie, et al. Modeling and

- application of phase-shifting transformer based on full winding topology structure[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(12): 101-106.
- [10] 谢子豪, 杜兆斌, 孙展域, 等. 基于节点功率注入的双芯对称型晶闸管可控移相器机电暂态建模[J]. *南方电网技术*, 2023, 17(5): 71-79.
XIE Zihao, DU Zhaobin, SUN Zhanyu, et al. Electromechanical transient modeling of two-core symmetrical thyristor controlled phase shifting transformer based on nodal power injection[J]. *Southern Power System Technology*, 2023, 17(5): 71-79.
- [11] 周飞, 于弘洋, 方万良, 等. 分级投切可控移相器稳态相量建模与分析[J]. *电网技术*, 2013, 37(11): 3184-3189.
ZHOU Fei, YU Hongyang, FANG Wanliang, et al. Steady state phasor modeling and analysis of hierarchically switched thyristor controlled phase shift transformer[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(11): 3184-3189.
- [12] 郭家鹏, 郝正航, 陈卓, 等. 对称双芯移相变压器阻抗计算及仿真建模研究[J]. *高压电器*, 2022, 58(4): 80-86.
GUO Jiapeng, HAO Zhenghang, CHEN Zhuo, et al. Research on impedance calculation and simulation modeling of symmetrical two-core phase-shifting transformer[J]. *High Voltage Apparatus*, 2022, 58(4): 80-86.
- [13] ZHANG N Y, ZHU X Y, LIU J K. Improving the consumption capacity of wind power in distributed network using a thyristor controlled phase shifting transformer[C]//2021 3rd Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES). Chengdu, China. IEEE, 2021: 80-84.
- [14] 董靓媛, 李晓军, 戎士洋, 等. 双芯对称型移相变压器应用场景分析[J]. *河北电力技术*, 2022, 41(5): 20-24.
DONG Jingyuan, LI Xiaojun, RONG Shiyang, et al. Application scenario analysis of dual-core symmetrical phase-shifting transformers[J]. *Hebei Electric Power*, 2022, 41(5): 20-24.
- [15] 张宁宇, 张恪, 李群, 等. 基于改进 MCCIPM 的含 TCPST 电力系统最优潮流计算[J]. *电力工程技术*, 2021, 40(5): 144-150.
ZHANG Ningyu, ZHANG Ke, LI Qun, et al. Optimal power flow calculation of power system containing TCPST based on improved MCCIPM[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2021, 40(5): 144-150.
- [16] 颜湘武, 王阳, 贾焦心. 双芯移相变压器在主动配电网电压和潮流调控中的应用分析[J]. *华北电力大学学报(自然科学版)*, 2024, 51(3): 20-29.
YAN Xiangwu, WANG Yang, JIA Jiaoxin. Application analysis of dual-core phase-shifting transformers in active distribution network voltage and power flow regulation[J]. *Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition)*, 2024, 51(3): 20-29.
- [17] 徐志, 刘静佳, 蒋羽鹏, 等. 基于移相变压器+调压变压器的 10 kV 配电网合环控制装置及控制方法[J]. *南方电网技术*, 2023, 17(3): 85-96.
XU Zhi, LIU Jingjia, JIANG Yupeng, et al. Loop closing control device and control method of 10 kV distribution network based on phase shifting transformer and voltage regulating transformer[J]. *Southern Power System Technology*, 2023, 17(3): 85-96.
- [18] 康逸群, 宋梦琼, 罗辉, 等. 计及可控移相器的电力系统潮流优化[J]. *湖北电力*, 2016, 40(10): 11-16, 27.
KANG Yiqun, SONG Mengqiong, LUO Hui, et al. Optimal power flow of power system with thyristor controlled phase shifting transformer[J]. *Hubei Electric Power*, 2016, 40(10): 11-16, 27.
- [19] 田翠华, 游奕弘, 费雯丽, 等. 基于新型移相变压器的单电源配电网潮流优化[J]. *电工电能新技术*, 2018, 37(12): 52-59.
TIAN Cuihua, YOU Yihong, FEI Wenli, et al. Power flow optimization of single power supply loop distribution network based on novel phase shifting transformer[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2018, 37(12): 52-59.
- [20] 马龙义, 沈鑫皓, 戴广平. 基于多条件约束的移相变压器选址研究[J]. *青海电力*, 2022, 41(4): 58-62.
MA Longyi, SHEN Xinhao, DAI Guangping. Study on site selection of phase shifting transformer based on multiple constraints[J]. *Qinghai Electric Power*, 2022, 41(4): 58-62.
- [21] 范国晨, 杜兆斌, 李作红, 等. 可控移相器对电网短路电流特性影响及限流控制策略[J]. *电网与清洁能源*, 2022, 38(9): 34-44.
FAN Guochen, DU Zhaobin, LI Zuohong, et al. Influence of the thyristor controlled phase shift transformer on power grid short-circuit current characteristics and current limiting control strategy[J]. *Power System and Clean Energy*, 2022, 38(9): 34-44.
- [22] FAN G C, LI J L, DU Z B, et al. A short-circuit current suppression method for power system with TCPST based on controllable reactors[C]//2023 8th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). Tianjin, China. IEEE, 2023: 452-457.
- [23] JUN L, FANG W L, DUAN C, et al. Fault current limiting by phase shifting angle control of TCPST[C]//2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Denver, CO. IEEE, 2015: 1-6.
- [24] LIU J, HAO X D, WANG X, et al. Application of thyristor controlled phase shifting transformer excitation impedance switching control to suppress short-circuit fault current level[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2018, 6(4): 821-832.
- [25] 余珊, 夏成军, 范国晨, 等. 可控移相器抑制短路电流的控制策略[J]. *广东电力*, 2022, 35(6): 41-49.
YU Shan, XIA Chengjun, FAN Guochen, et al. Control strategy of thyristor controlled phase shifting transformer to suppress short-circuit current[J]. *Guangdong Electric Power*,

- 2022, 35(6): 41-49.
- [26] LI H Y, ZHENG T, HUANG S F, et al. A fault ride through strategy of unified power flow controller and its coordination with protection[J]. *Electric Power Systems Research*, 2020, 184: 106323.
- [27] LI H Y, ZHENG T, HUANG S F, et al. UPFC fault ride-through strategy based on virtual impedance and current limiting reactor[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 125: 106491.
- [28] 林金娇, 李鹏, 高磊, 等. 基于提升故障穿越能力的 UPFC 重启策略研究及应用[J]. *高压电器*, 2020, 56(2): 163-169.
LIN Jinjiao, LI Peng, GAO Lei, et al. Restarting strategy of UPFC control protection system with application for improving fault ride-through capability[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(2): 163-169.
- [29] 潘磊, 李斌, 杨光, 等. 交流系统故障时统一潮流控制器处理策略[J]. *电力工程技术*, 2017, 36(6): 132-137.
PAN Lei, LI Bin, YANG Guang, et al. Control and protection strategies of unified power flow controller during AC system failure[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2017, 36(6): 132-137.

作者简介:



李鹏

李鹏(1982), 男, 博士, 正高级工程师, 从事柔性交流输电、高压直流输电及电力系统继电保护相关工作(E-mail: roclarry@163.com);

林金娇(1988), 女, 硕士, 高级工程师, 从事柔性交流输电、电力系统继电保护相关工作;

陈实(1991), 男, 博士, 高级工程师, 从事电力系统继电保护相关工作。

Ride-through strategies of thyristor controlled phase shifting transformer under grid faults

LI Peng, LIN Jinjiao, CHEN Shi

(State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: Thyristor controlled phase shifting transformer (TCPST) is a new type of power flow control equipment. Due to its series and shunt coupling topology and special connection to the power grid, it is necessary to consider the handling strategy in case of power grid faults. Based on the structure and principle of TCPST, the influence of grid fault on TCPST is analyzed in this paper. It is clarified the distribution of fault current and characteristics of overcurrent and overexcitation within TCPST. On this basis, the control strategy of TCSPT for deal with grid fault impact is proposed, and the fault state identification criterion and control sequences for the TCPST is constructed. By identifying the faults within and outside the zone of TCPST and the recovery state of power grid faults with the electrical quantities, the out of service and auto-restart strategy for TCPST are realized. The temporarily withdraw method for TCPST is used to protect equipment safety in the event of severe power grid faults. Finally, some simulations are conducted for the proposed fault ride-through strategy of TCPST. It is shown that the reliable ride-through of TCPST during power grid faults can be achieved by using the strategy, which has a good application for feasibility and effectiveness of TCPST. It is benefit to take advantage of the potential of power flow regulation function of TCPST.

Keywords: thyristor controlled phase shifting transformer (TCPST); thyristor control switch; bypass switch; fault ride-through; auto-restart; fault recovery

(编辑 方晶)