

一种电网解列、并列与联络线潮流综合控制方法

刘家军,王锬,谭雅岚,杨松,任娟

(西安理工大学 水利水电学院,陕西 西安 710048)

摘要:为提高智能电网的自愈能力,提出了一种电网解列、并列与联络线潮流综合控制方法。在已安装的柔性交流输电(FACTS)装置中增加电气设备,使其转换成背靠背VSC-HVDC并网装置,结合失步解列判据及统一潮流控制器(UPFC)的控制原理,分析了电网解列、并列与联络线潮流控制三者间的相互作用机理。深入研究了3种运行模式间的转换电路,实现了不同运行状态之间的相互转换,增强了电网稳定性和恢复能力,提高了系统自动化水平。最后在PSCAD/EMTDC中搭建了系统仿真模型,验证了其可行性。

关键词:失步解列;同期并列;联络线潮流控制;控制策略;电网自愈

中图分类号:TM762 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed19326

An Integrated Control Method of Splitting ,Paralleling and Tie-line Power Flow

LIU Jiajun, WANG Kun, TAN Yalan, YANG Song, REN Juan

(*Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China*)

Abstract: In order to improve the self-healing ability of the smart grid, a integrated control method which is of power grid splitting, paralleling and tie-line power flow control was proposed. The flexible AC transmission (FACTS) device installed in power grid was converted to a back-to-back VSC-HVDC grid-connected device by adding electrical equipment. Combined with the out-of-step splitting criterion and the control theory of unified power flow controller(UPFC), the interaction mechanism of grid disconnection, paralleling and tie-line power flow control was analyzed. The conversion circuit among the three operating modes was researched in more depth to achieve the mutual conversion of different operating states, the stability and the capabilities of the grid were recovered, and the automation level of system was improved. Finally, the system model was simulated in PSCAD/EMTDC and the results verify its feasibility.

Key words: out-of-step separation; system paralleling; tie-line power flow control; control strategy; self-healing system of power grid

大规模、大容量输电网互联,使得电网结构更加复杂化、运行方式更加多样化,给电网的安全稳定运行带来了诸多问题,尤其是电网出现严重故障时,则有可能造成事故连锁反应,引起系统大面积停电事故。坚强智能电网的提出,要求电网应具有一定的自愈能力,要求电网在正常稳定运行时能够实时地、连续地进行安全评估和状态优化,在异常情况下能及时对故障进行分析、隔离和自我恢复,尽可能将事故范围控制到最小、损失降到最低,使电网系统能最大程度地处在

在最优状态。

失步解列作为电力系统的最后一道保护防线,可以有效阻止系统大面积故障,但是解列后的系统往往存在波动问题,待解列的两侧系统稳定后,然后逐步恢复各解列子系统与整个系统的同步,即进行并网操作达到电网恢复。有时为了加快恢复并网的速度,在不满足同期并网的条件下,强行对解列子系统进行并网,会对系统造成很大的冲击^[1]。因此,防止电网事故连锁反应所造成的大面积故障既需要有效的失步解列判据,

基金项目:国家自然科学基金项目(51077109)

作者简介:刘家军(1967—),男,博士,教授,Email:liujiajun-88@163.com

也需要解列子系统快速准确地重新并网^[2],以及系统并列后对联络线潮流及时控制。故而研究电网快速解列与快速重新并网,实现解列、并列与联络线潮流功能的综合一体化控制,对提高电力系统自愈能力和自动化程度,有重要的现实意义。

目前国内外对解列、并列及联络线潮流控制的研究多以各自独立研究为主。文献[3]提出了背靠背电压源换流器型高压直流输电(voltage source converter based high voltage direct current, VSC-HVDC)应用于电网快速同期并列的方法,通过两侧待并电网的功率传递,可快速调整两侧压差、频差与相角差,完成并列操作。文献[4-5]中提出将背靠背电压源换流器应用于同期并网的方法,以及与静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)技术相结合形成同一装置,实现同期并列与无功补偿2种功能的复合系统。文献[6]分析了将背靠背VSC-HVDC应用于系统同期并列中,因两侧待并电网的功率传递及联络线上的开关操作所造成的功率波动机理。以上研究未涉及在同一控制器内对解列、并网、联络线潮流进行统一协调控制的综合控制策略。由于背靠背VSC-HVDC在电网发生严重故障解列后,可作为直流输电系统,向低周电网提供紧急功率支援,应尽可能减小切机、切负荷,增强UPFC对联络线潮流的控制功能^[7-8],缩短系统重新恢复并网的时间。本文提出了适合背靠背VSC-HVDC复合装置的失步解列判据,将失步解列控制功能融入到并网复合系统中,便于系统发生失步后快速解列减小对系统带来的危害,同时在背靠背VSC-HVDC应用于电网间同期并列的研究基础上,分析并网装置和UPFC装置的特点,提出并网装置转化为UPFC的方法,实现并网与联络线潮流的一体化控制,通过研究3种运行状态之间的相互作用机理与平滑转换,形成电网运行中解列、并列与联络线潮流控制于一体的综合控制策略。最后在PSCAD/EMTDC中搭建相应的仿真模型,仿真结果验证了综合策略的可行性与有效性。

1 基于背靠背VSC-HVDC的并网与联络线潮流综合控制

1.1 并网复合装置转换电路

在已安装了电压源型的STATCOM与静止同步串联补偿器(static synchronous series compen-

sator, SSSC)等FACTS装置的电网中^[9],通过增加1台换流变压器、相应数量的断路器及隔离开关等辅助电气设备,通过对应的电气操作,可实现背靠背VSC-HVDC电路结构,基于功率传递原理,结合并联侧的定有功和定无功控制以及串联侧的定直流电压和定无功功率控制,可实现同期并网功能。并网完成后,通过倒闸操作和切换控制策略可转换为UPFC装置,实现联络线的潮流控制,从而达到电网快速同期并网与联络线潮流的综合控制。并网复合装置功能转换结构如图1所示。

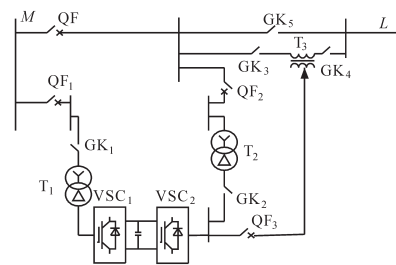


图1 并网复合装置功能转换结构图

Fig.1 Structure diagram of functional conversion for paralleling compound device

1.2 转换为并网装置电路结构

当系统在并网模式下运行时, $QF_1, GK_1, QF_2, GK_2, GK_5$ 合闸, QF_3, QF, GK_3, GK_4 分闸,构成了并网系统的电路结构,在相应控制策略下完成并网操作,并网成功时QF自动合闸, QF_1, QF_2 断开,背靠背VSC-HVDC退出运行。基于背靠背VSC-HVDC的并网装置电路结构如图2所示^[10]。

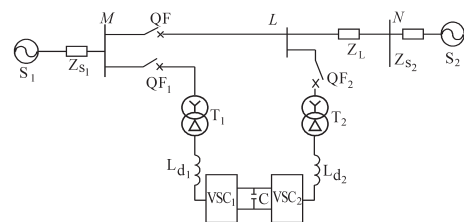


图2 基于背靠背VSC-HVDC并网装置电路结构图

Fig.2 Circuit structure diagram of paralleling device based on back-to-back VSC-HVDC

1.3 转换为UPFC装置电路结构

当装置完成并网,退出运行后,保持电路结构不变, GK_2, GK_5 断开,变压器 T_2 退出, QF_3, GK_3, GK_4 合闸,将背靠背电压源换流器与变压器 T_3 相连,再合上 QF_1 构成UPFC电路结构,在对应的控制策略下完成UPFC功能,以调整联络线潮流。UPFC装置的电路结构如图3所示。

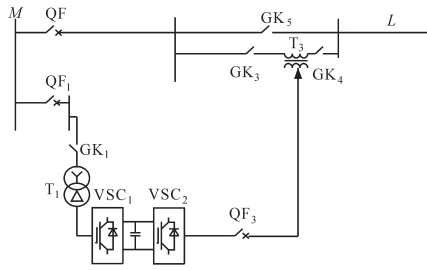


图3 UPFC装置电路结构图

Fig.3 Circuit structure diagram of UPFC device

2 基于背靠背 VSC-HVDC 并网复合系统中加入失步解列控制功能

目前大多数解列判据主要针对的是被动解列,被动解列点一般选择在:主系统与终端系统相连接的适当位置;未解环的高低压环网;电力系统间的联络线。本文选取联络线上便于解列子系统恢复同步的并列点作为失步解列点^[11],从而保证故障消除后系统能够快速恢复并网。

失步解列控制的核心是失步解列判据,常用的失步解列判据有:电流判据、相位角解列判据^[12]、 $U\cos\phi$ 解列判据^[13]、基于频率的失步解列判据^[14]等。通过深入分析各个解列判据的特点及适应场合,结合并网复合装置的运用情况,本文选择以联络线断路器合状态为启动判据,以 $U\cos\phi$ 判据为失步解列判据,对联络线进行监测,其中 U 为联络线电压, ϕ 为联络线电压电流的夹角, $U\cos\phi$ 代表了联络线振荡中心电压的标量^[15]。 $U\cos\phi$ 解列判据能够反映失步中心处的电压,且 $U\cos\phi$ 的轨迹与系统结构和运行方式无关。若系统出现失步振荡时, $U\cos\phi$ 连续变化,且过零;若发生同步振荡时, $U\cos\phi$ 连续变化,但不过零;若发生短路故障时, $U\cos\phi$ 不连续变化,并有突变,由此可判定系统是否失步,以及区分短路故障与同步振荡。考虑到在进行并网操作前,2个系统是断开的, $U\cos\phi$ 失步解列判据检测到系统是不同步的, $U\cos\phi$ 明显过零,系统收到的是解列信号,最终导致并网失败。故本文提出将联络线断路器的合状态作为失步解列判据的启动判据,即失步解列判据在并网操作过程中闭锁失步解列判据,待并列断路器合闸后,启动失步解列判据。失步解列判据动作图,即复合判据动作过程图如图4所示;失步解列判据动作示意表如表1所示。

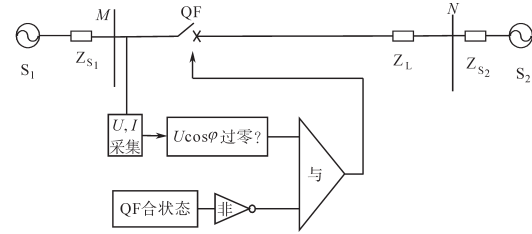


图4 复合判据动作过程图

Fig.4 The process diagram of composite criterion action

表1 失步解列动作分析表

Tab.1 The action analysis table of out-of-step splitting

断路器的状态取“非”	$U\cos\phi < 0$	$\cos\phi > 0$
1	1	0
0	0	0

3 解列、并列与联络线潮流控制三合一装置综合控制策略

3.1 3种工作模式的功能转换

解列、并列与联络线潮流控制3种工作模式在不同运行阶段下的9种运行工况如表2所示,其中“0”为此工作模式处于未工作状态; t_1, t_2, t_3 分别为系统在并网前、并网成功到解列前、发出解列指令及解列后尝试重新并网的运行时间段。

表2 3种工作模式的工况分析

Tab.2 The condition analysis of three operating modes

运行时间	工作模式		
	并网	UPFC	解列
t_1	背靠背 VSC 进行并网	0	0
t_2	背靠背 VSC 退出运行	UPFC 控制 联络线潮流	启动解列判据监测 联络线上的电气量
t_3	0	0	解列指令使系统解列, VSC-HVDC 作用于 重新并网

对表2所列的9种运行工况中不为零的运行工况设置一个控制选择开关 K ,由 K 的取值判别系统的工作模式^[16],在对应的控制策略下^[17],完成并网、UPFC控制、解列3种功能。并网复合装置中融入失步解列功能并未改变复合系统的电路拓扑结构,所以三合一复合装置的支路示意图与并网复合系统一致。 K 取决于对应的电路拓扑结构和相对应的开关状态。 K_L 表示从母线 M 经联络线 L 到母线 N 的通路,复合系统开关布局示意图如图5所示。

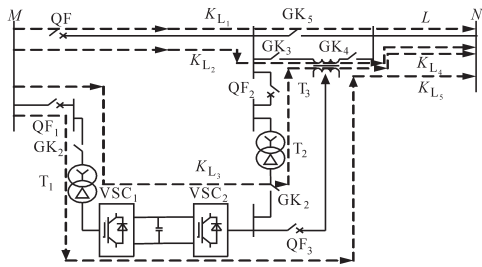


图5 复合系统开关布局示意图

Fig.5 Schematic diagram of switch layout in the compound system

由图5可知,从母线M到N共有5条通路, K_{L_i} ($i=1,2,\dots,5$)上对应的隔离开关与断路器如表3所示。

表3 K_{L_i} 通路上的对应开关

Tab.3 The corresponding switch on the K_{L_i} channel

通路	隔离开关和断路器
K_{L_1}	QF, GK ₅
K_{L_2}	QF, GK ₃ , GK ₄
K_{L_3}	QF ₁ , GK ₁ , GK ₂ , QF ₂ , GK ₅
K_{L_4}	QF ₁ , GK ₁ , GK ₂ , QF ₂ , GK ₃ , GK ₄
K_{L_5}	QF ₁ , GK ₁ , QF ₃ , GK ₄

隔离开关闭合取1,否则取0,通过逻辑与的关系得到 K_{L_i} 的值,分析复合装置在并网、联络线潮流控制与解列模式下的电路结构和相关电气操作可得三合一复合装置的支路开关变量值。如表4所示。

表4 三合一复合装置的支路开关变量值

Tab.4 The branch switch variable value of the three-in-one compound device

装置功能	K_{L_i} 取值				
	K_{L_1}	K_{L_2}	K_{L_3}	K_{L_4}	K_{L_5}
并网	0	0	1	0	0
UPFC	0	1	0	0	1
解列	0	0	0	0	0
VSC-HVDC退出运行	1	0	0	0	0

由表4可得: $K_1 = K_{L_3} = 1$ 为并网模式判据; $K_2 = K_{L_2} = K_{L_5} = 1$ 为UPFC模式判据; $K_3 = K_{L_1} = 1$ 为并网装置退出运行模式判据; $K_4 = K_{L_4} = 0$ 为解列模式判据。

3.2 综合控制流程

本文所提出的综合控制策略流程图如图6所示。在复合系统中接入一个多路选择开关,依据 K_i ($i=1,2,3,4$)的取值执行相应的控制策略,完成对应的功能。结合3种功能针对电网不同情况下的运行状态,可以形成一种闭环连续的控制策略流程^[18-19]。根据电网调度命令确定复合系统的运行状态,若调度命令是并网操作,在并网前闭锁失步解列功能,即失步解列控制功能不动作,复合装置通过相应的电气操作转换为背靠背VSC-HVDC电路结构,应用功率传递原理,通过控制策略,使相关电气量满足并网条件,断路器合闸,完成同期并网操作,背靠背VSC退出运行;随之

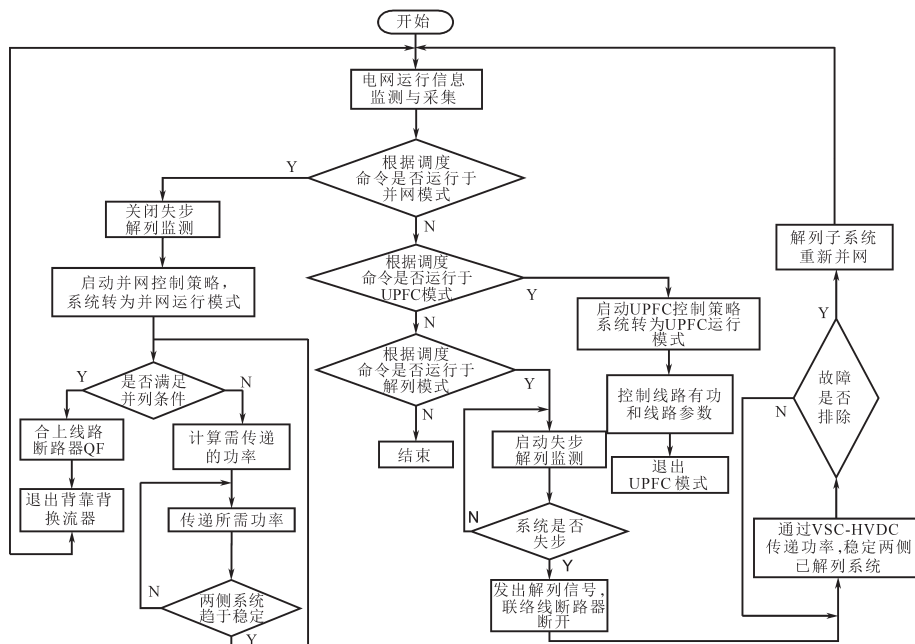


图6 综合控制策略流程图

Fig.6 Flow chart of compounding control strategy

启动解列判据,监测联络线上的相关电气量,此时若调度命令复合系统实现UPFC功能,则复合装置经过相应的电气开关转换操作转变为UPFC装置,在对应的控制策略下,对联络线潮流进行控制;当系统受到大的扰动而发生失步振荡时,解列判据发出解列指令,系统解列,联络线断路器断开,此时背靠背VSC-HVDC装置可以作为直流输电系统,对解列子系统进行功率支援,尽可能减少切机与切负荷操作给系统带来的冲击,使两侧系统能最大程度的处在稳定运行状态,待故障排除后,再根据调度命令尝试重新并网。

4 仿真实验及分析

在PSCAD/EMTDC仿真软件上,搭建同频环网解列与并列仿真主电路模型,如图7所示,电路中的三侧交流电源均采用电压源模型。 S_1 的基本参数为:额定电压 $U_N = 115.7\text{kV}$,初相角 $\delta = 0^\circ$,电源电抗 $L_3 = 0.01\text{H}$ 。 S_2 的基本参数为:额定电压 $U_N = 109.3\text{kV}$,初相角 $\delta = -3^\circ$,电源电抗 $L_S = 0.0764\text{H}$,负荷为 $(45 + j30)\text{MV}\cdot\text{A}$ 。 S_3 的基本参数为:额定电压 $U_N = 109.3\text{kV}$,初相角 $\delta = -11^\circ$,电源电抗 $L_S = 0.01\text{H}$ 。输电线路的参数为: $L_S = 0.0764\text{H}$, $R = 4.0\Omega$,设 $k_{p\theta} = 1$, $k_{qu} = 1$ 。

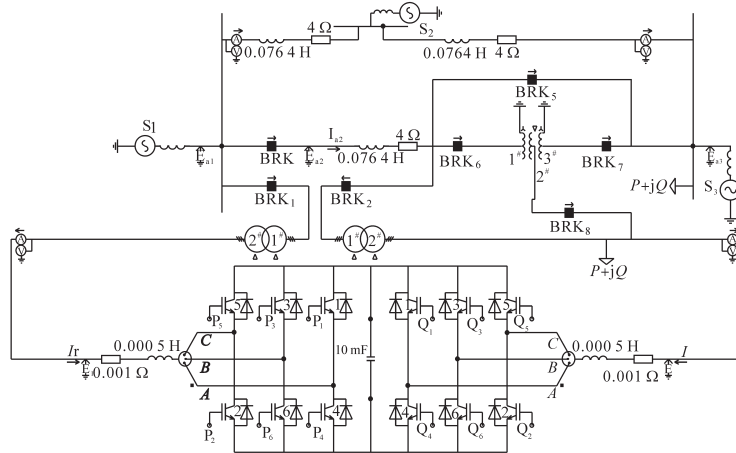


图7 仿真主电路图

Fig.7 Main circuit diagram of simulation

图8为并网复合系统转为UPFC的影响后,联络线并列点两侧变化曲线。

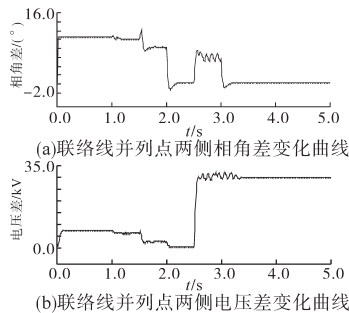


图8 并网复合系统转为UPFC的影响

Fig.8 Impact of the grid-connected compound system into UPFC

如图8所示,当 $t \leq 2\text{s}$ 时待并列两侧系统准备并网,应用功率传递原理,使两侧系统的相角差与电压差不断缩小至整定值范围内,达到并网的条件;在 $t=2\text{s}$ 时并网,并网成功,背靠背VSC-HVDC退出运行;在 $t=2.5\text{s}$ 时,并网系统模型转换为UPFC系统模型,系统联络线断路器两侧相

角差出现短暂的波动,随后又恢复到稳定值零,电压差在转化过程中经过微弱短暂的波动,最后稳定到一个不为零的常数值,其主要是由UPFC注入系统的功率产生的。由仿真结果可以看出,并网复合系统在转换为UPFC的过程中,对系统造成的扰动很小,系统依然处于相对稳定的状态,不会发生失步解列,图8的仿真结果验证了基于背靠背VSC-HVDC的复合系统转化为UPFC的有效性和可行性。

在并网操作完成后尝试在稳定运行的系统中模拟切机、切负荷及短路接地等故障,仿真结果验证了切机、切负荷以及短路故障会造成联络线中的电气量波动,但并未造成整个系统的失步振荡,故而解列判据不介入,图9a为并网成功后在 $t=3\text{s}$ 时 S_3 发生接地故障时 $U\cos\phi$ 波形变化图。由图可得出现短路故障时 $U\cos\phi$ 波形波动明显,但不过零,此时系统未失步,图9a的仿真结果表明采用 $U\cos\phi$ 判据可以很好地区分短路故障与失

步故障,从而避免系统发生误解列。图9b为联络线两端相角差波形,其仿真结果表明联络线两端相角差也发生一次明显的波动,但并未造成系统失步振荡,故而失步解列判据未发出解列信号。

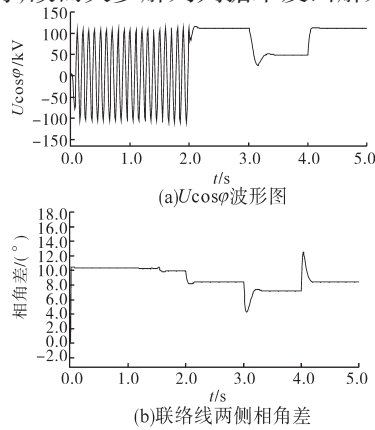


图9 系统短路故障时的仿真

Fig.9 Simulation of system short circuit fault

文献[20]中给出了联络线两端相角差和功角的函数关系。相角差失步解列判据通过检测线路两端电压差的变化可以准确地检测失步,不过该判据会受到失步故障的原因、失步前的潮流分布及系统不同的运行方式等的影响。但是可以确定的是,当线路两端相角差为 180° 时可判定系统已经失步。故为验证失步解列控制功能,通过编程使电源 S_3 的相角在 $t=3\text{ s}$ 时变化到 180° ,使系统发生失步振荡,以此来模拟系统失步。

图10为系统失步时的仿真图。由图10a中 $U\cos\phi$ 波形图可以看出,在 $t=3\text{ s}$ 时 $U\cos\phi$ 值迅速下降,过零点后则开始发生周期性波动。分析图10b可得, $t=3\text{ s}$ 时模拟联络线两端的相角差使其至 180° 左右,此时 $U\cos\phi$ 过零则判定系统失步,故发出解列信号,在 $t=3.2\text{ s}$ 时联络线断路器断开,系统解列,随后启动背靠背VSC定向定量传递功率,稳定两侧系统, $t=4\text{ s}$ 时,故障排除,系统开始恢复并网,图10a中 $t=4\text{ s}$ 时 $U\cos\phi$ 波形发生轻微变化,在经历近1个周期波动后,约 $t=4.5\text{ s}$ 时系统逐步恢复,重新稳定。图10b中在 $t=4\text{ s}$ 时相角差出现较小波动,随后逐步恢复到零。实际上,因 $t=3\text{ s}$ 时电源 S_3 相位角的突然变化,对系统产生较大波动,致使系统发生失步振荡,解列判据介入,发出解列信号,断路器接收并执行断开指令。其中以“1”为断开状态,“0”为合闸状态,如图11所示,在 $0\sim 2\text{ s}$ 阶段,因两侧系统通过背靠背VSC-HVDC传递功率,联络线断路器始终是断开信号;在 $t=2\text{ s}$ 时成功并网,系统发出合闸信号; $t=3\text{ s}$

时已并列系统发生失步振荡,在 $t=3.2\text{ s}$ 时复合判据发出解列信号,断路器断开,在 $t=4\text{ s}$ 时故障排除后系统重新并网。

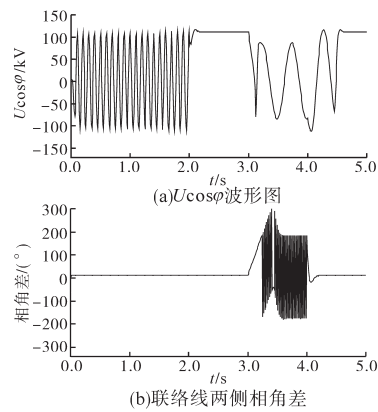


图10 系统失步时的仿真

Fig.10 Simulation of system out-of-step

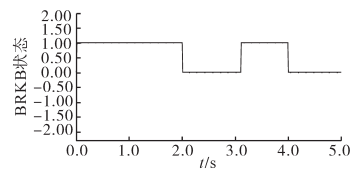


图11 联络线断路器的状态图

Fig.11 State diagram of tie-line breaker

图12为联络线电流变化波形图。图12反映了系统从并网、解列到重新恢复并网整个过程中联络线上的电流变化情况,分析可知,在 $t\leq 2\text{ s}$ 时两侧系统进行并网操作,断路器处于断开状态,联络线上电流为零; $t=2\text{ s}$ 时,并网成功,电流经较小波动之后趋于稳定; $t=3\text{ s}$ 时系统出现严重故障,造成失步振荡,联络线电流发生突变; $t=3.2\text{ s}$ 后因系统解列,断路器断开,电流突降至零; $t=4\text{ s}$ 时故障切除,重新并网; $t=4.2\text{ s}$ 时并网成功,电流经较小波动后趋于稳定,恢复正常。

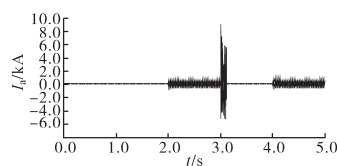


图12 联络线电流变化波形图

Fig.12 Waveform diagram of current variation in tie lines

5 结论

1) 提出了在电网中已安装的STATCOM及SSSC等FACTS装置为基础,增加1台换流变压器、相应数量的断路器及隔离开关等辅助电气设备,通过电气操作转换为背靠背电压源换流器并

网装置,或完成并网之后转为UPFC装置,实现并网与联络线潮流的综合控制,并仿真验证了复合装置转为UPFC的可行性。

2)提出了将联络线断路器的合状态作为 $U\cos\varphi$ 失步解列判据的启动判据,并将 $U\cos\varphi$ 失步解列判据运用到基于背靠背VSC-HVDC的并网复合系统中,使得并网复合系统具有解列控制功能,并仿真验证了所提出的复合判据可区分一般性故障,准确检测系统失步,并快速发出解列信号,使系统解列,从而抑制故障蔓延。

3)通过设置多路控制选择开关 K ,清晰了各运行状态之间的区别与联系,提出了各个运行状态之间的切换方法,构建了电网间解列、并列与联络线潮流控制的综合控制策略流程,并仿真验证了所提出的控制策略能够对系统失步解列与快速恢复并网进行有效地控制。

4)随着电力电子装置在电力系统中的广泛应用,拓展现有电力电子装置的功能是一个重要的研究课题。本文主要从理论上对电网解列、并列与联络线潮流综合控制方法进行了研究,为提高电网自愈能力提供了一种途径,但实际电网的结构复杂,运行方式多变,对控制的要求更高,需要更深一步研究。

参考文献

[1] Pourbeik P, Kundur P S, Taylor C W. The Anatomy of a Power Grid Blackout[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2006, 4(5):22-29.

[2] 胥威汀,戴松灵,张全明,等. 区域互联电网故障解列方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11):2756-2769.

[3] 刘家军,汤涌,姚李孝,等. 电压型换流器实现电网间同期并列的原理及仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 47(S1):12-17.

[4] 李广磊,李笋,孙树敏,等. 基于STATCOM和LCC-MTDC技术的大规模风电并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5):32-39.

[5] 刘家军,吴添森. 一种基于STATCOM的电网间同期并列复

合系统[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(18):87-91.

[6] 刘家军,闫泊,姚李孝,等. 基于功率传递并网方式的联络线功率波动研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(4):125-129.

[7] 王韶,刘光时,邹青林. 计及UPFC的电力系统多目标无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(8):96-100.

[8] 仇志华,徐丙垠,陈青. 基于统一潮流控制器的配电网潮流优化控制策略[J]. 电网技术, 2012, 36(6):123-126.

[9] 高磊,褚晓杰,汤涌,等. 电力系统多FACTS交互作用与协调控制综述[J]. 电网技术, 2016, 40(12):3749-3755.

[10] 范心明,管霖,夏成军,等. 风电场交直流混合输电并网中VSC-HVDC的控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28):4782-4789.

[11] Han Minxiao, Ding Hu, Chen Qing, et al. Coordinated Control Strategies of China-Russia BTB-HVDC and SVC[C]//Power and Energy Engineering Conference, 2009. APPEEC 2009. Asia-Pacific. IEEE, 2009: 1-5.

[12] Dong Xijian, Zhao Jie, Ling Chao, et al. Research on Out-of-step Oscillation Criterion Mechanism Based on Principle of Phase Angle[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(7):1-6(in Chinese).

[13] 宗洪良,任祖怡,郑玉平,等. 基于 $U\cos\varphi$ 的失步解列装置[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(19):83-85.

[14] 吴麟琳,黄少峰. 基于频率特征的失步解列判据原理[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1):18-22.

[15] 刘志雄,张艳霞,冯康恒,等. 基于广域信息跟踪电力系统振荡中心的方法及应用[J]. 电网技术, 2014, 38(6):1694-1699.

[16] 刘家军,刘昌博,徐银凤,等. 电网间同期并列复合系统控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(7):1533-1539.

[17] 李文芳,焦妍,刘星平. 基于一种新型锁相环的三相PWM整流器矢量控制[J]. 电气传动, 2017, 47(8):19-24.

[18] 杨哲,于飞,魏永清. 混合并联型逆变器的控制策略研究[J]. 电气传动, 2016, 46(2):21-25.

[19] 张古月,吉培荣,闫苏红,等. 基于改进开关矢量表的三相电压型PWM整流器[J]. 电气传动, 2017, 47(4):45-50.

[20] Li Li, Liu Yutian. Out-of-step Splitting Framework Based on Adaptive Separation Detecting Criterion[C]//Transmission & Distribution Conference&Exposition: Asia and Pacific. IEEE, 2009: 1-5.

收稿日期:2018-07-21

修改稿日期:2018-12-25