基于不平衡功率动态估计的直流幅值阶梯递增紧急功率支援

李从善,和 萍,金 楠,武 洁,陶玉昆,杨存祥,郭 健 (郑州轻工业学院 电气信息工程学院,河南 郑州 450002)

摘要:建立扰动下系统不平衡功率的扩张状态观测器,并对观测器参数进行设置,实现不平衡功率的实时准确估计;考虑影响直流紧急功率支援限制因素,优化紧急功率支援量,基于功率支援阶梯递增原则实现功率 支援目标;根据扰动功率大小,通过定义阈值指标实现3种幅值阶梯递增支援方案的选择。在 PSCAD 中搭 建4 机2 区域交直流并联输电系统,仿真结果验证了所提方法的有效性。

关键词:紧急功率支援;扩张状态观测器;功率支援限制因素;阶梯递增原则;交直流并联系统 中图分类号:TM 76 _______文献标识码:A _______DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.12.022

0 引言

随着坚强智能电网建设的逐步推进^[1],高压直流(HVDC)输电在区域大电网互联中扮演的角色越来越重要。由于 HVDC 具有快速和高度可控性,因此,通过对其附加控制可用于改善交直流互联系统的稳定性。直流附加控制包括紧急功率支援、频率控制、阻尼控制等。国内外专家学者针对这方面进行了较为广泛的研究^[24]。目前对直流紧急功率支援的研究主要集中在2个方面。

a. 功率支援限制因素研究^[7]。由于直流在进 行有功传输时,换流站需要吸收大量的无功功率,因 此,在直流功率提升时,需要考虑换流站无功功率限 制,否则将造成电压不稳定,也无法按照提升指令达 到功率提升的要求,另外需考虑直流系统功率传输 极限的限制。

b. 功率支援提升和回降时刻^[8] 以及提升量和 回降量研究。合适的直流紧急功率提升和回降时 刻、提升和回降量对抑制电网振荡至关重要,否则, 不仅不能起到积极的作用,反而可能会恶化系统。 由于系统不平衡功率是动态变化的,只有实时掌握 功率不平衡量的大小,才能制定合理的功率支援量。 从已有的研究中可以看出,现有紧急功率支援的提 升和回降量主要根据经验来确定,并没有给出具体 计算方法,并且在紧急功率支援时,支援量基本上都 是固定值。基于此,本文首先建立了系统不平衡功 率的扩张状态观测器 ESO (Expansion State

收稿日期:2018-02-01;修回日期:2018-09-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51607158,51507157); 河南省重大科技专项(161100211600);郑州轻工业学院博 士基金资助项目(2015BSJJ003)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51607158,51507157), the Major Science and Technology Special Projects of Henan Province(161100211600) and the Doctor Scientific Research Fund of Zhengzhou University of Light Industry (2015BSJJ003) Observer),并对观测器参数进行设置,实现不平衡功率的实时准确估计;然后考虑功率支援限制因素对功率支援量进行优化,以阶梯递增原则来实现功率支援;最后,通过对4机2区域交直流并联输电系统进行仿真,得出该功率支援方法能够实时动态调整功率支援量,具有较好的功率支援效果。针对功率扰动大小,通过定义阈值指标,实现了3种幅值阶梯递增支援方案的选择。

1 紧急功率支援机理分析

ċ

在研究扰动下的电力系统暂态稳定性问题时, 常常将系统等效为双机失稳模式,即将系统划分为 临界群 *S* 和余下群 *A*,因此系统功角稳定性问题即 变为临界群 *S* 对余下群 *A* 的相对摇摆问题。临界群 *S* 和余下群 *A* 的暂态运动方程为:

$$\begin{cases} \delta_{S} = \omega_{S} \\ \dot{\omega}_{S} = \frac{1}{M_{S}} \sum_{i \in S} (P_{mi} - P_{ei}) \\ \dot{\delta}_{A} = \omega_{A} \\ \dot{\omega}_{A} = \frac{1}{M_{A}} \sum_{j \in A} (P_{mj} - P_{ej}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \delta_{S} = \frac{1}{M_{S}} \sum_{i \in S} M_{i} \delta_{i} \\ \delta_{A} = \frac{1}{M_{S}} \sum_{i \in S} M_{j} \delta_{j} \\ \omega_{S} = \frac{1}{M_{S}} \sum_{i \in S} M_{i} \omega_{i} \\ \omega_{A} = \frac{1}{M_{A}} \sum_{j \in A} M_{j} \omega_{j} \\ M_{S} = \sum_{i \in S} M_{i} \\ M_{A} = \sum_{j \in A} M_{j} \end{cases}$$

$$(1)$$

其中, M_s , δ_s , ω_s 分别为临界群 S 的等值惯性时间常

数、等值功角以及等值角频率; $M_A \ \delta_A \ \omega_A$ 分别为余 下群 A 的等值惯性时间常数、等值功角以及等值角 频率; $M_i \ \delta_i \ \omega_i \ P_{mi} \ P_{ei}$ 分别为 S 中第 i 台机组的惯 性时间常数、功角、角频率、机械功率和电磁功率; $M_j \ \delta_j \ \omega_j \ P_{mj} \ P_{ej}$ 分别为 A 中第 j 台机组的等值惯性 时间常数、功角、角频率、机械功率和电磁功率。

合并式(1),则两机群暂态运动状态方程可以 等效为单机系统,等效的单机系统转子运动方程为:

$$\begin{cases} \delta_{SA} = \omega_{SA} \\ \dot{\omega}_{SA} = \frac{1}{M_S} \sum_{i \in S} \left(P_{mi} - P_{ei} \right) - \frac{1}{M_A} \sum_{j \in A} \left(P_{mj} - P_{ej} \right) \end{cases}$$
(3)

其中, $\delta_{SA} = \delta_S - \delta_A$; $\omega_{SA} = \omega_S - \omega_{A\circ}$

对于上述等效的单机系统,正常稳定运行时, $\dot{\omega}_{SA}$ =0;当系统内部发生故障时,则由于发电机转子 的惯性作用,无法保证机械功率和电磁功率瞬时相 等,在不平衡力矩的作用下,将导致发电机转子速度 发生变化,此时 $\dot{\omega}_{SA} \neq 0$,若不能及时有效地施加控制 措施,则会导致 δ_{SA} 加大,超出系统稳定的运行点范 围,最终引起系统失稳。

以临界群 S 内部发电机突发严重故障导致的切机为例,这种情况将导致临界群 S 区域内的机械功率小于电磁功率,则转子将会减速。若将功率支援等效为机械功率,在式(3)中通过附加紧急功率支援援措施,则式(3)变为:

$$\begin{cases} \delta_{SA} = \omega_{SA} \\ \dot{\omega}_{SA} = \frac{1}{M_S} \sum_{i \in S} \left[\left(P_{mi} + \Delta P_m \right) - P_{ei} \right] - \\ \frac{1}{M_A} \sum_{j \in A} \left[\left(P_{mj} - \Delta P_m \right) - P_{ej} \right] \end{cases}$$
(4)

其中, ΔP_m 为直流紧急功率支援量。

由式(4)可以看出,通过直流附加紧急功率支援措施,可以实现稳定功角的目的。ΔP_m的大小与系统内部不平衡功率具有至关重要的关系,不平衡功率由于系统自身调节作用以及负荷响应等,其大小是实时动态变化的。通过实时在线估计系统不平衡功率的大小制定合理的功率支援量。

2 构建不平衡功率估测器

已有研究采用 ESO 理论进行电力系统故障或 扰动的诊断,文献[9]通过在 HVDC 状态方程上引 入新的参数来构造一个虚拟故障,并通过迭代求解 实现对故障的估计。文献[10]采用 ESO 的方法实 现对电机转子磁链的观测。

本文在前人研究的基础上,提出采用 ESO 来研 究交直流互联系统区域内功率不平衡量估计,将系 统不平衡功率等效为一个扰动状态量,从而实现对 其大小的估计,进而制定紧急功率支援策略。ESO 是自抗扰控制器的核心组成部分^[11]。从某种意义 上,ESO 是通用而实用的扰动观测器^[12],可以处理 常见的系统参数未知、未建模动态、未知负载扰动等 不确定性问题。

2.1 ESO 基本原理 系统数学模型的一般表达式为:

$$x^{n} = f(x, \dot{x}, \cdots, x^{(n-1)}, t) + w(t) + bu$$

$$y = x$$
(5)

其中,w(t)为系统未知扰动; $f(x, \dot{x}, \cdots x^{(n-1)}, t)$ 为未 知函数, $x, \dot{x}, \cdots, x^{(n-1)}$ 为状态变量;u为控制量;b为 控制量系数;n为状态变量个数。

设置 $x_1(t) = x(t), x_2(t) = \dot{x}(t), \dots, x_n(t) = x^{(n-1)}(t), x_{n+1}(t) = w(t),$ 可得系统式(5)的等价方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_{1}(t) = x_{2}(t) \\ \dot{x}_{2}(t) = x_{3}(t) \\ \vdots \\ \dot{x}_{n}(t) = x_{n+1}(t) + f(x, \dot{x}, \cdots, x^{(n-1)}, t) + bu \\ \dot{x}_{n+1}(t) = \dot{w}(t) \\ y = x_{1}(t) \end{cases}$$
(6)

 $x_{n+1}(t)$ 为系统的扩张状态,则可对状态 $x_{n+1}(t)$ 进行实时估计。对系统式(6)建立其 ESO 为:

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 e \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_2 \operatorname{fal}(e, \alpha/2, d) \\ \vdots \\ \dot{z}_n = z_{n+1} - \beta_n \operatorname{fal}(e, \alpha/2^{n-1}, d) + bu \\ \dot{z}_{n+1} = -\beta_{n+1} \operatorname{fal}(e, \alpha/2^n, d) \end{cases}$$
(7)

其中,*z*₁、…、*z*_n为原系统各个状态的估计值;*z*_{n+1}为系统的扩张状态,即未知函数的估计值;*d*为等于采样步长的数学量;fal(·)为非光滑函数,如式(8)所示。

$$\operatorname{fal}(e,\alpha,d) = \begin{cases} |e|^{\alpha} \operatorname{sign}(e) & |e| > d \\ e/d^{1-\alpha} & |e| \le d \end{cases}$$
(8)

其中,0<α≤1₀

由式(8)可知,只要适当选取观测器参数 β_r (r= 1,2,…,n+1),由系统的输入和输出即可实现对系统状态的估计,ESO 如图 1 所示。



Fig.1 Schematic diagram of ESO

2.2 不平衡功率估测器构建

定义系统角频率为其惯量中心 COI(Center Of

Inertia)的等值角速度,即:

150

$$\boldsymbol{\omega}_{\text{COI}} = \frac{1}{M_{\text{JT}}} \sum_{l=1}^{L} M_{\text{J}l} \boldsymbol{\omega}_l \tag{9}$$

其中, $M_{JT} = \sum_{l=1}^{L} M_{JI}, M_{JI}$ 为第 l 台发电机的惯性时间常数, L 为系统内发电机总数。系统惯性中心角频率与系统惯性中心频率的关系为 $\omega_{COI} = 2\pi f_{COI}$ 。

发电机频率变化率与功率变化量有如下 关系^[13]:

$$\dot{f} = \frac{f_0}{M_{\rm IT}} (P_{\rm m} - P_{\rm e}) = \frac{f_0}{M_{\rm IT}} \Delta P \tag{10}$$

其中, f 为惯性中心机组频率变化率; P_m 为等效机 组的机械功率; P_e 为等效机组的电磁功率; f_0 为系 统稳态频率 50 Hz; ΔP 为系统不平衡功率。

将式(10)中的 $\frac{f_0}{M_{JT}}\Delta P$ 看作是系统的扰动量,记为 w(t),则该式可以写成:

$$\dot{f} = w(t) \tag{11}$$

式(11)表示 0 输入系统,即控制量 u 为 0,写成 状态方程形式为:

$$\begin{cases} \dot{x}_{1}(t) = x_{2}(t) \\ \dot{x}_{2}(t) = \dot{a}(t) \\ y = x_{1}(t) \end{cases}$$
(12)

其中,
$$x_1(t) = f; x_2(t) = a(t) = \frac{f_0}{M_{JT}} \Delta P_0$$

根据 ESO 原理,式(12)可写成 ESO 的形式:

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 e \\ \dot{z}_2 = -\beta_2 \operatorname{fal}(e, \alpha/2, d) \end{cases}$$
(13)

其中, z_1 为f的估计值; z_2 为系统扩张状态,即 $\frac{f_0}{M_{JT}}\Delta P$ 的估计值。因此,通过建立系统的ESO,最终可以实现对不平衡量 ΔP 的实时估计,记为 $\Delta \hat{P}$:

$$\Delta \hat{P} = \frac{-z_2 M_{\rm JT}}{f_0} \tag{14}$$

 $\Delta \hat{P}$ 称为伪控制量,是因为实际在进行功率支援时,由于受到功率支援限制因素的影响,功率支援量并不一定等于 $\Delta \hat{P}$ 。

3 紧急功率支援限制因素

对于设计出的功率支援提升量,直流系统能否按照功率提升指令达到设计的功率提升要求,主要依赖于两方面的限制因素:一方面是交流系统母线电压水平,其本质上是由于 HVDC 在提升有功功率时需要消耗大量的无功功率,这将导致交流系统无

功不足,导致母线电压跌落,由此导致直流系统无法 有效提升功率支援量,该限制因素与交流系统强度 具有直接的关系;另一方面是直流系统本身的输电 能力,HVDC 输电系统一般均具有1.1 倍的长期过载 能力和1.5 倍的3 s 短时过载能力,除过载运行外, 直流输电系统还有最小功率限制,这是由直流系统 具有最小的电流限制因素决定的,当电流低于限值 时,将导致直流电流断流现象。

本文通过定义电压敏感因子 VSF(Voltage Sensitive Factor)指标来评估交流系统母线电压水平对 功率提升量的限制,具体定义为:

$$F_{\rm VSF} = \frac{\Delta U}{U_{\rm N}} \tag{15}$$

其中, ΔU 为单位直流功率提升量导致的交流母线电压跌落量; U_N 为交流系统母线电压额定值。则:

$$k\Delta \hat{P}F_{\rm VSF} = \frac{k\Delta P\Delta U}{U_{\rm N}} \tag{16}$$

若 kΔPF_{vsr}的值在电压允许的波动范围内,则 k 取值为 1,功率提升量等于观测器估计的不平衡功 率;反之,则按照电压允许波动的最大值计算此时的 k 值。考虑直流有功功率提升会导致换流母线电压 跌落,因此需配置无功补偿,补偿容量按照直流满载 运行时的 50% 来配备^[14]。对于直流系统输电能力 的限制可以通过限幅环节来实现。

4 阶梯式递增原则进行功率支援

將

$$\Delta P_{\rm m} = k\Delta P \, \text{t} \Lambda \text{t} \Lambda \text{t} (4) \, \text{P} \text{f} \text{s} :$$

$$\dot{\omega}_{SA} = \frac{1}{M_S} \sum_{i \in S} \left[\left(P_{\rm mi} + k\Delta \hat{P} \right) - P_{ei} \right] - \frac{1}{M_A} \sum_{j \in A} \left[\left(P_{\rm mj} - k\Delta \hat{P} \right) - P_{ej} \right]$$

$$(17)$$

其中, $\dot{\omega}_{sA}$ 为功角振荡加速度。显然, 通过对直流进 行附加紧急功率控制, 能够实现两侧系统功率平衡 的目的。在功率支援时, 功率提升速率对系统具有 较大的影响。为了实现暂态过程的平稳过渡, 本文 基于阶梯递增原则, 最终实现功率支援目标。功率 阶梯递增原理示意图如图 2 所示。



图 2 功率阶梯递增 Fig.2 Increasing block power

阶梯递增功率支援是在斜坡式功率支援的基础 上发展起来的^[15]。根据已有研究,*N*值取值范围在 4~8之间较为合适。N值越小,则单次提升的功率 就会变大,可能导致直流系统最终运行点距离所要 求运行点的偏差过大;N值越大,则单次提升的功率 就会变小,起不到紧急功率支援的目的,并且会导致 直流功率频繁调整引起损耗加大。当交流系统较强 时,N值可以适当减小,反之,则适当增大。

基于动力学和运动学理论观点,物体在平衡运 动状态受扰后,若要使系统平稳过渡到平衡状态,则 施加的外力作用要根据具体情况做出改变。刚开始 过大的外力可能会对系统造成太大的冲击,过小的 外力对维持系统平衡作用甚微,这应该是动态变化 的过程,电力系统运行与动力学和运动学变化过程 具有相似性。受上述启发,本文将对比分析3种阶 梯递增功率支援方案,即等幅值阶梯递增(EASI)、 减幅值阶梯递增(DASI)和增幅值阶梯递增(IASI)。

EASI 方案为每次提升不平衡功率的 25%; DASI 方案为第一次提升总不平衡功率的40%,后面依次 是 30%、20%、10%; IASI 方案为第一次提升总不平 衡功率的10%,后面依次是20%、30%、40%。3种阶 梯递增功率支援方案都是分4步提升。

由此得到功率支援的控制结构见图 3.图中 f 为 受端交流系统等值惯性中心的频率,T为积分时间 常数, ΔP_{max} 、 ΔP_{min} 分别为直流功率调制量的上限和 下限。仿真中,3种阶梯递增控制方案均在直流控 制系统中设置。



5 仿真分析

在 PSCAD 中搭建 4 机 2 区域交直流并联输电 系统,系统结构如图4所示。区域1和区域2各有2 台同步发电机,4 台发电机额定功率均为 900 MW, G₁和G₂惯性时间常数均为6.5 s₁G₃和G₄惯性时 间常数均为6.175 s。稳态运行时,2条交流联络线 的单回传输功率相等,即 $P_{ac1} = P_{ac2} = 103$ MW,直流 传输的有功功率为 198 MW, 整流端负荷为 323 MW, 逆变端负荷为 648 MW。控制方式为整流侧定 电流控制、逆变侧定电压控制。

首先,通过参数整定分离性原则和经验参数整



图 4 直流输电系统结构图



$$\begin{cases} \delta = h \\ \beta_1 = 1/h \\ \beta_2 = 1/(3h^2) \end{cases}$$
(18)

其中,h 为采样步长。

ESO 各参数的作用为: α 和 δ 增大,对状态的跟 踪变慢,稳态误差变小;β,增大,对状态的跟踪变 慢,稳态误差增大,超调减小;β,增大,对状态的跟 踪变快,稳态误差增大,超调增大。最后观测器参数 整定为 α/2=0.5 、d=0.05 、β1=20 、β2=50。系统稳态 时,对观测器性能进行测试,结果见图 5、6(图中纵 轴均为标幺值)。



Fig.6 Steady-state output

从仿真结果可以看出,通过合适的参数整定,观 测器能够实现快速准确跟踪系统状态量 f,并且稳态 时系统输出是0,证明该观测器设计及参数整定是 合理的,且性能良好。

下面分2种情况对本文所提方法进行验证。在 进行阶梯递增紧急功率支援时,阶梯递增的时间间 隔Δt 分别设置为 0.1 s 和 0.3 s。

情况1:逆变侧母线处馈线支路由于故障在2s 时被切除,导致失去负荷 400 MW,0.5 s 后恢复对负 荷供电。以 G₃ 功角 δ_3 以及 G₁ 和 G₃ 功角差 δ_{13} 作为

观测对象,仿真结果见图 7(图中纵轴均为标幺值, 后同)。图 7(a)—(c)阶梯递增时间间隔为 0.1 s, 图 7(d)、(e)阶梯递增时间间隔为 0.3 s。





图 7(a)为观测器估计的系统实时不平衡功率, 从图中可以看出,采用紧急功率支援后,系统能够相 对快速地实现功率平衡。在这种情况下,3 种阶梯 递增功率支援方案对稳定系统功率平衡的能力几乎 是相同的。

图 7(b)、(c)分别为阶梯递增时间间隔为 0.1 s

时 G₃ 功角变化曲线以及 G₁ 和 G₃ 功角差变化曲线, 由图中可以看出,采用紧急功率支援后,系统功角能 够快速平稳过渡到稳定状态。同样在这种情况下,3 种阶梯递增功率支援效果几乎相同。

图 7(d)、(e)分别为阶梯递增时间间隔为 0.3 s 时 G₃ 功角的变化曲线以及 G₁和 G₃ 功角差变化曲 线。从图中可以看出,随着阶梯递增时间间隔的增 加,3种功率支援方案产生的效果发生了变化。由 图中可以看出,EASI和 DASI 的效果差别不大,但两 者均略优于 IASI。

情况2:与直流并联输电的2条交流输电线路由 于在2s时发生故障,导致两侧断路器跳闸,3s时故 障清除,重合闸成功,以G₁和G₃的功角差作为观测 对象,仿真结果见图8。



Fig.13 Power angle difference between G1 and G3 in Case 2

图 8(a)为阶梯递增时间时间间隔为 0.1 s 时 G₁ 和 G₃ 功角差变化曲线,在这种情况下,3 种阶梯递 增功率支援方案同样没有明显差别。图 8(b)为阶 梯递增时间时间间隔为 0.3 s 时 G₁ 和 G₃ 功角差变 化曲线,在这种情况下,EASI 和 DASI 的效果差别不 大,但 IASI 要略微优于前两者。

通过对比情况 1 和情况 2 可以发现,在情况 1 时,系统受到的扰动导致系统内不平衡功率初始值 为 400 MW;而情况 2 下即使 2 条交流联络线断开, 其造成的系统不平衡功率量的初始值为 2 条交流线 路正常传输功率之和,为 206 MW。情况 1 时,采用 EASI 和 DASI 优于 IASI;情况 2 时,采用 IASI 优于 EASI 和 DASI。由此得出,阶梯递增功率支援要根 据系统总不平衡量功率的大小来选择,当系统不平 衡功率较大时,选择 EASI 或 DASI,反之则选择 IASI。为了定量评估扰动大小,进而为方案选择提 供依据,本文定义了阈值指标,其定义为扰动造成的 系统不平衡功率最大值的绝对值与系统容量的比 值,即:

$$k_{\rm PD} = \frac{\Delta P_{\rm d\cdot max}}{C} \tag{19}$$

其中, ΔP_{d-max} 为扰动造成的系统瞬时不平衡量功率的最大值;C为系统容量; $0 < k_{PD} < 1_{\circ}$

通过逐次增加功率扰动值并进行仿真,最终得 出的结论是:当 $k_{\rm PD}$ >8%时,认为是大扰动,则应选择 EASI或 DASI;反之当 $k_{\rm PD}$ <8%时,则选择 IASI。

6 结论

本文提出了一种基于系统功率不平衡量估计的 自适应紧急功率支援方法,能够自适应地根据系统 的运行状态实现功率自动调整,对于抑制电网振荡 具有非常好的效果,并对3种阶梯递增功率支援方 案进行了仿真分析,验证了该方法的有效性。得出 的结论主要有2点:

a. 系统内功率不平衡量是实时变化的量,本文 基于不平衡功率实时在线估计的紧急功率支援策略 能够实时调整功率支援量,从而实现动态优化的功 率支援目标;

b. 对于3种阶梯递增功率支援方案,当扰动造成系统总不平衡量功率较大,即超出本文定义的阈值指标时,选择 EASI 或 DASI,反之则选择 IASI。

本文提出的紧急功率支援方法具有自适应性, 对实际交直流系统附加暂态控制具有一定的参考和 借鉴意义。

参考文献:

- [1]黄训诚,和萍,崔光照,等.中国智能电网发展述评,展望与建议
 [J]. 轻工学报,2016,31(2):54-64.
 HUANG Xuncheng, HE Ping, CUI Guangzhao, et al. Review, development and suggestion of Chinese smart grid[J]. Journal of Light Industry,2016,31(2):54-64.
- [2]赵磊,刘天琪,李兴源. 基于变结构控制理论的高压直流附加频率控制器设计[J]. 电力自动化设备,2017,37(11):218-223.
 ZHAO Lei,LIU Tianqi,LI Xingyuan. Design of HVDC additional frequency controller based on variable structure control theory [J].
 Electric Power Automation Equipment,2017,37(11):218-223.
- [3] HARNEFORS L, JOHANSSON N, ZHANG L, et al. Inter area oscillation damping using active power modulation of multi terminal HVDC transmissions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5):2529-2538.
- [4] 王兴刚,张虹,徐政,等. 基于轨迹灵敏度的多回直流紧急功率 提升策略[J]. 电力自动化设备,2014,34(10):86-91.
 WANG Xinggang,ZHANG Hong,XU Zheng, et al. Emergency power support for multiple DCs based on trajectory sensitivity[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(10):86-91.
- [5] 丁贵立,林涛,陈汝斯,等. 基于参量 Lyapunov 理论的广域时滞 阻尼控制器设计[J]. 电力自动化设备,2018,38(8):81-87.
 DING Guili,LIN Tao,CHEN Rusi, et al. Design of wide-area timedelay damping controller based on parametric Lyapunov theory[J].

Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8):81-87.

- [6] 李从善,刘天琪,刘利兵,等. 直流多落点系统自抗扰附加阻尼 控制[J]. 电工技术学报,2015,30(7):10-17.
 LI Congshan, LIU Tianqi, LIU Libing, et al. A auto disturbance rejection controller of multi-HVDC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2015,30(7):10-17.
- [7] 翁华,徐政,许烽,等. 直流系统紧急功率支援的限制因素分析
 [J]. 中国电机工程学报,2014,34(10):1519-1527.
 WENG Hua,XU Zheng,XU Feng, et al. Research on constraint factor of emergency power support of HVDC systems [J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(10):1519-1527.
- [8] 谢惠藩,张尧,林凌雪,等.基于时间最优和自抗扰跟踪的广域 紧急直流功率支援控制[J].电工技术学报,2010,25(8): 145-153.

XIE Huifan, ZHANG Yao, LIN Lingxue, et al. Emergency DC power support control based on time-optimal control and auto-disturbance rejection control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8):145-153.

- [9] 颜秉勇,田作华,施颂椒,等. 高压直流输电系统故障诊断新方法[J]. 电力系统自动化,2007,31(16):57-61.
 YAN Bingyong,TIAN Zuohua,SHI Songjiao, et al. A new method for fault diagnosis in HVDC systems [J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(16):57-61.
- [10] 林飞,张春朋,宋文超,等. 基于扩张状态观测器的感应电机转 子磁链观测[J]. 中国电机工程学报,2003,23(4):145-147. LIN Fei,ZHANG Chunpeng, SONG Wenchao, et al. Flux observer of induction motor based on extended state observer[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(4):145-147.
- [11] 韩京清. 一类不确定对象的扩张状态观测器[J]. 控制与决策, 1995,10(1):85-88.
 HAN Jingqing. The extended state observer of a class of uncertain system[J]. Control and Decision, 1995,10(1):85-88.
- [12] 韩京清. 自抗扰控制技术[M]. 北京:国防工业出版社,2013: 183-242.
- [13] KRISHAYYA P C S, ADAPA R, HOLM M. IEEE guide for planning DC links terminating at AC locations having low short-circuit capacities: IEEE Standard 1204-1997 [S]. [S.l.]: IEEE, 1997.
- [14] 肖鸣,傅闯. 高压直流低负荷无功优化功能运行分析[J]. 电力 系统自动化,2010,34(5):91-95.
 XIAO Ming,FU Chuang. An operation analysis of HVDC low load reactive power optimization function[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(5):91-95.
- [15] 刘崇茹,魏佛送,陈作伟,等. 幅值自适应的阶梯式紧急功率支援控制技术[J]. 电力系统自动化,2013,37(21):123-128.
 LIU Chongru, WEI Fosong, CHEN Zuowei, et al. Magnitude adaptive emergency power support control technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21):123-128.

作者简介:



李从善(1985—),男,河北邯郸人,讲 师,博士,主要研究方向为高压直流输电、电 力系统稳定分析与控制(E-mail:543627767@ qq.com);

和 萍(1980—),女,河南鄢陵人,副 教授,博士,主要从事电力系统稳定性分析 控制、风电并网等方面的研究;

金 楠(1982—),男,河北石家庄人,副教授,博士,主要 研究方向为电力电子系统及其控制。

DC amplitude stepped incremental emergency power support based on dynamic estimation of unbalanced power

LI Congshan, HE Ping, JIN Nan, WU Jie, TAO Yukun, YANG Cunxiang, GUO Jian

(School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The extended state observer of unbalanced power in power system under disturbance is built, and its parameters are set up to realize the real-time and accurate estimation of unbalanced power. Considering the limiting factors of DC emergency power support, the emergency power support capacity is optimized, and the power support target is achieved based on the stepped increment principle of power support. According to the power disturbances, the threshold index is defined to realize the selection of three amplitude stepped incremental support schemes. A 4-machine 2-area AC/DC parallel transmission system is built in PSCAD, and the simulative results verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: emergency power support; extended state observer; limiting factor of power support; stepped increment principle; AC/DC parallel system

(上接第 139 页 continued from page 139)

式电源对配电网短路电流的影响[J]. 电力自动化设备,2015, 35(8):31-37.

TAN Huizhneg,LI Yongli,CHEN Xiaolong,et al. Influence of inverterinterfaced distributed generator with low-voltage ride-through capability on short circuit current of distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(8):31-37.

- [11] 刘健,林涛,李龙,等. 分布式光伏接入情况下配电自动化系统的适应性[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(20):7-12.
 LIU Jian,LIN Tao,LI Long, et al. Adaptability of distribution automation systems to photovoltaic installation[J]. Power System Protection and Control,2014,42(20):7-12.
- [12] 贺家李,李永丽,董新洲,等. 电力系统继电保护原理[M]. 4 版. 北京:中国电力出版社,2010:141.

作者简介:



陈晓龙(1985—),男,河南濮阳人,讲师,博士,主要研究方向为微电网、含分布式 电源配电网及交直流混联电网保护与控制 (E-mail:promising1207@163.com);

李永丽(1963—),女,河北石家庄人,教授,博士研究生导师,博士,从事电力系统故障分析、保护与控制等工作(E-mail:lyltju@

163.com);

孙景钉(1983—),男,浙江瑞安人,高级工程师,博士,主 要研究方向为电网运行、分布式发电及微电网技术(E-mail: sunjingliao@163.com)。

Novel protection scheme based on status information for distribution network with DGs

CHEN Xiaolong¹, LI Yongli¹, SUN Jingliao²

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Company Wenzhou Electric Power Supply Company, Wenzhou 325200, China)

Abstract: In order to eliminate the impact of DG(Distributed Generation) on protection and reduce the improvement cost as much as possible, a novel protection scheme based on multi-point status information for distribution network with DGs is proposed. For radial lines in the downstream area of DG and the feeders without DG access, the scheme can rapidly and accurately realize the fault location according to the action information of over-current protection. Moreover, a new criterion of the polarity information of compensation impedance and the corresponding fault locating method are proposed based on the voltage and current information at the head of feeder and the point of common coupling. When the fault occurs in the upstream area of DG, the proposed scheme can rapidly and accurately isolate the fault lines without additional potential transformer. Finally, the faults on a 10 kV distribution network with DGs are simulated and analyzed by PSCAD/EMTDC, and the results verify the effectiveness and correctness of the proposed scheme.

Key words: distributed power generation; distribution network; action information of over-current protection; polarity information of compensation impedance; fault location