计及 SNOP、DSTATCOM 和 B-DSTATCOM 传输功率损耗及 控制方式的柔性配电网状态估计

马鑫1,2,田 蓓1,2,李宏强1,2,薛 飞1,2,黄永宁1,张汉花1,2,吴玟蓉1,2

(1. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院,宁夏 银川 750002;2. 宁夏电力能源安全重点实验室,宁夏 银川 750002)

摘要:随着智能软常开开关(SNOP)和配电网静止同步补偿器(DSTATCOM)等新型配电设备的投入,需要对含SNOP和DSTATCOM的柔性配电网进行准确的静态状态估计。首先构建了基于加权最小绝对值法的配电网状态估计模型;其次提出了考虑SNOP、DSTATCOM及含蓄电池储能DSTATCOM(B-DSTATCOM)的传输功率损耗和多种控制方式的柔性配电网状态估计模型,进一步给出了保证可观测性需求的量测方程、控制伪量测方程及约束条件;最后基于IEEE 33节点柔性配电网测试系统,验证了所提方法的有效性和实用性。测试结果证明了所提状态估计模型对于SNOP、DSTATCOM及B-DSTATCOM不同控制方式的适用性以及考虑其传输功率损耗的必要性。

DOI:10.16081/j.epae.202009038

0 引言

随着分布式电源及分布式储能系统在配电网的 不断接入,配电网必要的控制能力极为匮乏,需要装 设柔性配电设备来提高其主动控制能力^[1]。其中, 智能软常开开关(SNOP)实现了不同电压等级的配 电网和不同相角的馈线之间的互连,通过潮流的四 象限运行实现系统的有功-无功的综合调控,解决了 配电网供电能力不足的问题^[2],是实现配电网柔性 互联与负荷转供的重要设备之一^[3]。另外,配电网 静止同步补偿器(DSTATCOM)能为配电网提供快 速、动态的无功补偿,可提高配电网电压稳定性,进 行谐波滤波及补偿不平衡负荷,在中低压配电网中 得到推广应用^[4]。此外,含蓄电池储能(BESS)的 DSTATCOM(以下简称 B-DSTATCOM)能实现潮流的 四象限控制和有功-无功的综合调控,具有更加广阔 的应用前景^[5]。

柔性配电设备在配电网投运后,大幅提高了配 电网运行的经济性和灵活性,但同时也对配电网的 运行控制提出了更高的要求^[1]。目前对于含 SNOP 及 DSTATCOM 的柔性配电网的控制策略^[6-7]、潮流计 算^[8]、转供策略^[9]、最优潮流^[5,10]、配置优化^[11]等方面 均已开展了深入研究。而在柔性配电网的运行方式 计算和控制方式调整中,状态估计作为其重要的数 据基础,扮演着重要角色。因此有必要研究含 SNOP

收稿日期:2020-02-10;修回日期:2020-08-04

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFE0132100); 宁夏 自然科学基金资助项目(2020AAC03483)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2017YFE0132100) and the Natural Science Foundation of Ningxia(2020AAC03483)

及DSTATCOM的柔性配电网状态估计方法。

现有配电网三相状态估计研究中,绝大多数状态估计方法都仅针对传统配电网电压幅值及相角的状态变量^[12-13]、分布式电源^[14]和分布式储能系统^[15]内部的状态变量进行状态估计,部分研究考虑了分布式电源和分布式储能系统内部的量测数据,一定程度上拓展了传统配电网状态估计的覆盖范围,但以上研究均没有考虑柔性配电设备的稳态模型及相应状态量。针对柔性配电设备的潮流计算和最优潮流相关研究,在进行建模的过程中,通常忽略了柔性配电设备的传输功率损耗及不同的控制方式对稳态模型的影响。而文献[16]指出SNOP、DSTATCOM以及 B-DSTATCOM的传输功率损耗占其传输功率的5%左右,在状态估计中难以忽略不计。

针对以上问题,本文首先介绍了所采用的状态 估计算法,其次提出了计及SNOP、DSTATCOM以及 B-DSTATCOM传输功率损耗及控制方式的柔性配电 网状态估计模型,考虑柔性配电设备及柔性配电网的 三相不平衡特性,并基于柔性配电网可观测性的需 要,进一步给出稳态潮流量测方程、控制伪量测方程 和等式约束。最后,针对修改后的IEEE 33节点柔性 配电网算例,采用原对偶内点法进行求解,验证了状 态估计模型对于SNOP、DSTATCOM及B-DSTATCOM 不同控制方式的适用性以及考虑其传输功率损耗的 必要性,从估计误差、计算时间及抗差性这3个方面 验证了所提方法的有效性和实用性。

1 状态估计算法

通常将基于加权最小绝对值状态估计问题描述 为式(1)所示的二次约束二次优化问题^[17],即:

$$\min \mathbf{J}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{m} (\Delta z_i^+ + \Delta z_i^-) / \sigma_i$$

s.t.
$$\begin{cases} \tilde{z}_e = \mathbf{h}_e(\mathbf{x}) \\ \tilde{z} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \Delta z^+ - \Delta z^- \\ \Delta z_i^+ \ge 0, \ \Delta z_i^- \ge 0 \end{cases}$$
 (1)

其中,J(x)为目标函数;x为n维状态变量; $\Delta z^{+},\Delta z^{-}$ 为量测误差的松弛向量, $\Delta z_{i}^{+},\Delta z_{i}^{-}$ 分别为 $\Delta z^{+},\Delta z^{-}$ 中的第i个元素," Δ "表示对应变量的误差值; σ_{i} 为权重 系数矩阵 σ 中的元素; \tilde{z} 为m维量测向量,"-"表示对 应变量的量测量;h(x)为量测方程; $\tilde{z}_{e} = h_{e}(x)$ 为精确 的等式约束。

2 柔性配电网的状态估计模型

本文以基于电压源型换流器(VSC)的 SNOP、 DSTATCOM及 B-DSTATCOM为研究对象,柔性配电 网的结构如图1所示。



图1 柔性配电网的结构图

Fig.1 Structure diagram of flexible distribution network

2.1 配电网的量测方程

节点i处 $\psi(\psi=a,b,c)$ 相电压 $V_{i,\psi}$ 的量测量为:

$$\tilde{V}_{i,\psi} = \sqrt{e_{i,\psi}^2 + f_{i,\psi}^2} + \Delta V_{i,\psi}$$
(2)

其中, $i \in N_{\rm B}$, $N_{\rm B}$ 为配电网节点的集合; $e_{i,\psi}$ 、 $f_{i,\psi}$ 分别为 节点i处 ψ 相电压的实部、虚部。为简化式(2),令 $U_{i,\psi}^2 = e_{i,\psi}^2 + f_{i,\psi}^2$,经数据采集与监视控制(SCADA)系 统处理后的电压量测变换为:

$$\tilde{V}_{i,\psi} = U_{i,\psi} + \Delta V_{i,\psi} \tag{3}$$

支路ij上 ψ 相传输电流的实部 $I_{ij,\psi,x}$ 虚部 $I_{ij,\psi,y}$ 及 量测量 $\tilde{I}_{ij,\psi}$ 分别为:

$$\begin{cases} I_{ij,\psi,x} = \sum_{\varphi=a,b,c} [(e_{i,\varphi} - e_{j,\varphi})g_{ij,\psi\varphi} - (f_{i,\varphi} - f_{j,\varphi})b_{ij,\psi\varphi}] \\ I_{ij,\psi,y} = \sum_{\varphi=a,b,c} [(e_{i,\varphi} - e_{j,\varphi})b_{ij,\psi\varphi} - (f_{i,\varphi} - f_{j,\varphi})g_{ij,\psi\varphi}] \end{cases}$$
(4)

$$\tilde{I}_{ij,\psi} = \sqrt{I_{ij,\psi,x}^2 + I_{ij,\psi,y}^2} + \Delta I_{ij,\psi}$$
(5)

其中,*j*为节点编号,*j* \in *N*_B; $g_{ij,\psi\varphi}$ 、 $b_{ij,\psi\varphi}$ 分别为支路ij上 ψ 相对 φ 相的电导、电纳。

令
$$(I'_{ij,\psi})^2 = I^2_{ij,\psi,x} + I^2_{ij,\psi,y}$$
,则式(5)变换为:

$$\tilde{I}_{ij,\psi} = I'_{ij,\psi} + \Delta I_{ij,\psi}$$
(6)

支路ij上ψ相传输有功功率量测量 P̃_{ij,ψ}、无功功

率量测量 $\tilde{Q}_{i,\psi}$ 以及节点i处 ψ 相注入有功功率量测量 $\tilde{P}_{i,\psi}$ 、无功功率量测量 $\tilde{Q}_{i,\psi}$ 分别为:

$$\begin{cases} \tilde{P}_{ij,\psi} = e_{i,\psi} \sum_{\varphi=a,b,c} \left[(e_{i,\varphi} - e_{j,\varphi}) g_{ij,\psi\varphi} - (f_{i,\varphi} - f_{j,\varphi}) b_{ij,\psi\varphi} \right] + \\ f_{i,\psi} \sum_{\varphi=a,b,c} \left[(e_{i,\varphi} - e_{j,\varphi}) b_{ij,\psi\varphi} - (f_{i,\varphi} - f_{j,\varphi}) g_{ij,\psi\varphi} \right] + \Delta P_{ij,\psi} \\ \tilde{Q}_{ij,\psi} = f_{i,\psi} \sum_{\varphi=a,b,c} \left[(e_{i,\varphi} - e_{j,\varphi}) b_{ij,\psi\varphi} - (f_{i,\varphi} - f_{j,\varphi}) g_{ij,\psi\varphi} \right] - \\ e_{i,\psi} \sum_{\varphi=a,b,c} \left[(e_{i,\varphi} - e_{j,\varphi}) g_{ij,\psi\varphi} - (f_{i,\varphi} - f_{j,\varphi}) b_{ij,\psi\varphi} \right] + \Delta Q_{ij,\psi} \end{cases}$$
(7)

$$\begin{cases} \tilde{P}_{i,\psi} = e_{i,\psi} \sum_{j \in \Omega_i \varphi = a, b, c} \left(e_{j,\varphi} B_{ij,\psi\varphi} + f_{j,\varphi} G_{ij,\psi\varphi} \right) + \\ f_{i,\psi} \sum_{j \in \Omega_i \varphi = a, b, c} \left(e_{j,\varphi} G_{ij,\psi\varphi} - f_{j,\varphi} B_{ij,\psi\varphi} \right) + \Delta P_{i,\psi} \\ \tilde{Q}_{i,\psi} = f_{i,\psi} \sum_{j \in \Omega_i \varphi = a, b, c} \left(e_{j,\varphi} B_{ij,\psi\varphi} + f_{j,\varphi} G_{ij,\psi\varphi} \right) - \\ e_{i,\psi} \sum_{j \in \Omega_i \varphi = a, b, c} \left(e_{j,\varphi} G_{ij,\psi\varphi} - f_{j,\varphi} B_{ij,\psi\varphi} \right) + \Delta Q_{i,\psi} \end{cases}$$

$$(8)$$

其中, Ω_i 为交流配电网中与节点*i*相连的节点集合; $G_{ij,\psi\varphi}$, $B_{ij,\psi\varphi}$ 分别为交流配电网中与节点*i*相连的所有 支路ij中 ψ 相对 φ 相的电导、电纳。

2.2 SNOP的稳态潮流量测方程

SNOP通常安装在配电网联络开关处,通过控制两侧的VSC实现潮流四象限运行,进而改善潮流分布,提升电压水平^[2]。

SNOP 的稳态潮流示意图见图 2。图中, $V_{i,\psi}^{s,vsc}$ 、 $V_{j,\psi}^{s,vsc}$ 分别为 SNOP 支路节点 $i_x j$ 侧 VSC 的 ψ 相基波 电压; $V^{s,Dc}$ 为 SNOP 支路 VSC 直流侧的电压; $P_{i,\psi}^{s,Ac}$ 和 $Q_{i,\psi}^{s,Ac}$ 分别为 SNOP 支路两端节点i侧输入的 ψ 相有 功功率和无功功率; $P_{i,\psi}^{s,vsc}$ 和 $Q_{i,\psi}^{s,vsc}$ 、 $P_{j,\psi}^{s,vsc}$ 和 $Q_{j,\psi}^{s,vsc}$ 分别 为 SNOP 支路由节点 $i_x j$ 侧流入 VSC 的 ψ 相有功功 率和无功功率; $I_{i,\psi}^{s,vsc}$ 为 SNOP 支路节点i侧流入 VSC 的 ψ 相电流; $Y_{i,\psi}^{s,vsc}$ 为 SNOP 支路节点i侧换流变压器的 等效 ψ 相导纳, $Y_{i,\psi}^{s,vsc} = g_{i,\psi}^{s,vsc} + jb_{i,\psi}^{s,vsc}$ 。

$$\underbrace{P_{i,\psi}^{S,AC} + jQ_{i,\psi}^{S,AC}}_{V_{i,\psi}} \underbrace{P_{i,\psi}^{S,NSC} + jQ_{i,\psi}^{S,VSC}}_{Y_{i,\psi}^{S,NSC}} \underbrace{V_{s,DC}^{S,VSC} + jQ_{i,\psi}^{S,VSC} + jQ_{i,\psi}^{S,VSC}}_{V_{j,\psi}^{S,VSC}} \underbrace{V_{j,\psi}^{S,VSC} + jQ_{i,\psi}^{S,VSC} + jQ_{i,\psi}^{S,VSC}}_{V_{j,\psi}^{S,VSC}} \underbrace{V_{j,\psi}^{S,VSC} + jQ_{i,\psi}^{S,VSC} + jQ_{i,\psi}^{S,VSC} + jQ_{i,\psi}^{S,VSC}}_{V_{j,\psi}^{S,VSC}} \underbrace{V_{j,\psi}^{S,VSC} + jQ_{i,\psi}^{S,VSC} + jQ_{$$

图 2 SNOP 稳态潮流示意图

Fig.2 Schematic diagram of SNOP steady state power flow

 $\tilde{V}_{i,\psi}^{s,vsc}$ 、 $\tilde{V}_{j,\psi}^{s,vsc}$ 、 $\tilde{V}_{i,\psi}$ 、 $\tilde{V}_{j,\psi}$ 均采用式(3)所示的电压 量测方程; $\tilde{I}_{i,\psi}^{s}$ 、 $\tilde{I}_{j,\psi}^{s}$ 均采用式(6)所示的电流量测方 程。状态变量 $V^{s,pc}$ 、 $\tilde{V}^{s,pc}$ 、 $\tilde{V}_{i,\psi}^{s,vsc}$ 构成SNOP支路的状 态估计方程,即:

$$\begin{cases} \tilde{V}^{\text{S, DC}} = V^{\text{S, DC}} + \Delta V^{\text{S, DC}} \\ \tilde{V}^{\text{S, VSC}}_{i,\psi} = \mu M^{\text{S, VSC}}_{i,\psi} V^{\text{S, DC}} / \sqrt{3} \end{cases}$$
(9)

其中,μ为直流电压利用率,当调制方式为正弦脉冲

宽度调制(SPWM)时, $\mu = 0.866$; $M_{i,\psi}^{s.vsc}$ 为SNOP支路 上节点*i*侧VSC的调制度, $0 \le M_{i,\psi}^{s.vsc} \le 1$ 。

 $\tilde{P}_{i,\psi}^{\text{S},\text{AC}}$, $\tilde{P}_{j,\psi}^{\text{S},\text{AC}}$, $\tilde{Q}_{j,\psi}^{\text{S},\text{AC}}$, $\tilde{Q}_{j,\psi}^{\text{S},\text{AC}}$, $\tilde{Q}_{j,\psi}^{\text{S},\text{AC}}$, $\tilde{Q}_{j,\psi}^{\text{S},\text{VSC}}$, $\tilde{Q}_{j,\psi}^{\text{S},\text{VSC}}$, $\tilde{Q}_{j,\psi}^{\text{S},\text{VSC}}$ 均采用 式(8)所示的传输功率量测方程。SNOP支路两端流 入VSC的无功功率通常被VSC的无功补偿环节吸 收。由于SNOP由2个背靠背VSC组成,SNOP支路 传输损耗通常大于其传输功率的5%,因此不可忽 略。则SNOP支路两端流入VSC的有功功率存在如 下关系:

$$\begin{cases} P_{i,\psi}^{\text{S,VSC}} + P_{i,\psi}^{\text{Loss}} = P_{j,\psi}^{\text{S,VSC}} + P_{j,\psi}^{\text{Loss}} \\ P_{i,\psi}^{\text{Loss}} = \alpha + \beta I_{i,\psi}^{\text{S}} + \gamma (I_{i,\psi}^{\text{S}})^{2} \\ P_{j,\psi}^{\text{Loss}} = \alpha + \beta I_{j,\psi}^{\text{S}} + \gamma (I_{j,\psi}^{\text{S}})^{2} \end{cases}$$
(10)

其中, $P_{i,\psi}^{\text{Loss}}$, $P_{j,\psi}^{\text{Loss}}$ 分别为 SNOP 支路节点 i, j 侧的 ψ 相 传输功率损耗; α, β, γ 为 VSC 在实际应用中的损耗 系数。

2.3 DSTATCOM的稳态潮流量测方程

DSTATCOM可为柔性配电网提供快速、动态的 无功补偿,并能有效滤除谐波,提高配电网电压暂态 稳定性,补偿不平衡负荷及提高负荷功率因数^[5]。

DSTATCOM的稳态潮流示意图见图3。图中, $V_{i,\psi}^{DS,VSC}$ 为DSTATCOM支路在节点*i*侧VSC的 ψ 相基波 电压; $V^{DS,DC}$ 、 $P^{DS,DC}$ 分别为DSTATCOM支路直流侧的 电压、有功功率; $P_{i,\psi}^{DS,AC}$ 、 $Q_{i,\psi}^{DS,AC}$ 分别为DSTATCOM支路输入节点*i*侧 ψ 相的有功、无功功率; $P_{i,\psi}^{DS,VSC}$ 、 $Q_{i,\psi}^{DS,VSC}$ 分别为DSTATCOM支路节点*i*侧流入VSC的 ψ 相有 功、无功功率; $I_{i,\psi}^{DS,VSC}$ 为DSTATCOM支路节点*i*侧流入 VSC的 ψ 相电流; $Y_{i,\psi}^{DS,VSC}$ 为DSTATCOM支路换流变 压器的 ψ 相等效导纳, $Y_{i,\psi}^{DS,VSC} = g_{i,\psi}^{DS,VSC} + jb_{i,\psi}^{DS,VSC}$ 。

$$\underbrace{\frac{P_{i,\psi}^{\mathrm{DS}} + jQ_{i,\psi}^{\mathrm{DS}}}{V_{i,\psi}}}_{V_{i,\psi}} \underbrace{\frac{P_{i,\psi}^{\mathrm{DS,VSC}} + jQ_{i,\psi}^{\mathrm{DS,VSC}} + jQ_{i,\psi}^{\mathrm{DS,VSC}}}{V_{i,\psi}^{\mathrm{DS,VSC}} + V_{i,\psi}^{\mathrm{DS,VSC}}} \underbrace{\frac{P_{i,\psi}^{\mathrm{DS,OC}}}{V_{i,\psi}^{\mathrm{DS,OC}}}}_{V_{i,\psi}^{\mathrm{DS,OC}}}$$

图 3 DSTATCOM 稳态潮流示意图

Fig.3 Schematic diagram of DSTATCOM steady state power flow

 $\tilde{V}_{i,\psi}^{\text{DS,VSC}}$ 、 $\tilde{V}_{i,\psi}$ 均采用式(3)所示的电压量测方程; $\tilde{I}_{i,\psi}^{\text{DS,VSC}}$ 采用式(6)所示的电流量测方程。状态变量 $V^{\text{DS,DC}}$ 、 $\tilde{V}_{i,\psi}^{\text{DS,DC}}$ 、 $\tilde{V}_{i,\psi}^{\text{DS,DC}}$ 、 $\tilde{V}_{i,\psi}^{\text{DS,VSC}}$ 构成 DSTATCOM 支路的状态估 计方程,即:

$$\begin{cases} \tilde{V}^{\text{DS, DC}} = V^{\text{DS, DC}} + \Delta V^{\text{DS, DC}} \\ \tilde{V}^{\text{DS, VSC}}_{i,\psi} = \mu M^{\text{DS, VSC}}_{i,\psi} V^{\text{DS, DC}} / \sqrt{3} \end{cases}$$
(11)

其中, $M_{i,\psi}^{\text{DS,VSC}}$ 为节点*i*处DSTATCOM的VSC调制度, $0 \le M_{i,\psi}^{\text{DS,VSC}} \le 1_{\circ}$

 $\tilde{P}_{i,\psi}^{\text{DS,AC}}$ 和 $\tilde{Q}_{i,\psi}^{\text{DS,AC}}$ 均采用式(7)所示的注入功率量 测方程; $\tilde{P}_{i,\psi}^{\text{DS,VSC}}$ 和 $\tilde{Q}_{i,\psi}^{\text{DS,VSC}}$ 均采用式(8)所示的传输功 率量测方程。DSTATCOM从节点*i*流入VSC的无功 功率通常被VSC的无功补偿环节吸收。DSTATCOM 支路中*P*^{DS,DC}与*P*^{DS,VSC}存在如下关系:

$$\begin{cases} P^{\text{DS, DC}} = \sum_{\psi=a,b,c} \left(P^{\text{DS, VSC}}_{i,\psi} + P^{\text{DS, Loss}}_{i,\psi} \right) \\ P^{\text{DS, Loss}}_{i,\psi} = \alpha + \beta I^{\text{DS, VSC}}_{i,\psi} + \gamma \left(I^{\text{DS, VSC}}_{i,\psi} \right)^2 \end{cases}$$
(12)

其中, $P_{i,\psi}^{DS,Loss}$ 为 DSTATCOM 支路的 ψ 相传输功率 损耗。

电池储能可直接并联在直流电容两侧结合为B-DSTATCOM,两者共用1个VSC提供直流电压和电流经电抗器接入电网。因此以上DSTATCOM的量测方程同样适用于B-DSTATCOM。

2.4 SNOP、DSTATCOM 和 B-DSTATCOM 控制方式 的伪量测方程

SNOP、DSTATCOM 和 B-DSTATCOM 作为可控 器件,在进行状态估计时通常已知其控制目标值,可 作为伪量测量以提高状态估计的冗余度。

以 SNOP 支路节点 *i* 侧、节点 *i* 处 B-DSTATCOM 或 DSTATCOM 的 VSC 为例,增加如下 5 种控制方式 的伪量测方程,分别见式(13)—(17),其中变量的上标 "*"代表 SNOP、B-DSTATCOM、DSTATCOM 的设 备类别。

(1)定交流侧有功功率控制。

$$\tilde{P}_{i,\psi}^{*,AC} = e_{i,\psi}^{*,AC} \sum_{\varphi=a,b,c} \left(e_{i,\psi}^{*,AC} - e_{i,\psi}^{*,VSC} \right) g_{i,\psi\varphi}^{*,VSC} - e_{i,\psi}^{*,AC} \sum_{\varphi=a,b,c} \left(f_{i,\psi}^{*,AC} - f_{i,\psi}^{*,VSC} \right) b_{i,\psi\varphi}^{*,VSC} + f_{i,\psi}^{*,AC} \sum_{\varphi=a,b,c} \left(e_{i,\psi}^{*,AC} - e_{i,\psi}^{*,VSC} \right) b_{i,\psi\varphi}^{*,VSC} - f_{i,\psi}^{*,AC} \sum_{\varphi=a,b,c} \left(f_{i,\psi}^{*,AC} - f_{i,\psi}^{*,VSC} \right) g_{i,\psi\varphi}^{*,VSC} + \Delta P_{i,\psi}^{*,AC}$$
(13)

其中, $e_{i,\psi}^{*,AC}$ 、 $f_{i,\psi}^{*,AC}$ 和 $e_{i,\psi}^{*,VSC}$ 、 $f_{i,\psi}^{*,VSC}$ 分别为 $V_{i,\psi}^{*,AC}$ 和 $V_{i,\psi}^{*,VSC}$ 的实部、虚部。

(2)定交流侧无功功率控制。

$$\begin{split} \tilde{Q}_{i,\psi}^{*,\mathrm{AC}} = & f_{i,\psi}^{*,\mathrm{AC}} \sum_{\varphi=\mathrm{a,b,c}} \left(e_{i,\psi}^{*,\mathrm{AC}} - e_{i,\psi}^{*,\mathrm{VSC}} \right) b_{i,\psi\varphi}^{*,\mathrm{VSC}} - \\ & f_{i,\psi}^{*,\mathrm{AC}} \sum_{\varphi=\mathrm{a,b,c}} \left(f_{i,\psi}^{*,\mathrm{AC}} - f_{i,\psi}^{*,\mathrm{VSC}} \right) g_{i,\psi\varphi}^{*,\mathrm{VSC}} - \\ & e_{i,\psi}^{*,\mathrm{AC}} \sum_{\varphi=\mathrm{a,b,c}} \left(e_{i,\psi}^{*,\mathrm{AC}} - e_{i,\psi}^{*,\mathrm{VSC}} \right) g_{i,\psi\varphi}^{*,\mathrm{VSC}} + \\ & e_{i,\psi}^{*,\mathrm{AC}} \sum_{\varphi=\mathrm{a,b,c}} \left(f_{i,\psi}^{*,\mathrm{AC}} - f_{i,\psi}^{*,\mathrm{VSC}} \right) b_{i,\psi\varphi}^{*,\mathrm{VSC}} + \Delta Q_{i,\psi}^{*,\mathrm{AC}} \quad (14) \end{split}$$

(3)定直流侧电压控制。

$$\tilde{V}^{*,\,\mathrm{DC}} = V^{*,\,\mathrm{DC}} + \Delta V^{*,\,\mathrm{DC}} \tag{15}$$

$$V_{i,\psi}^{*,\text{vsc}} = U_{i,\psi}^{*,\text{vsc}} + \Delta V_{i,\psi}^{*,\text{vsc}}$$
(16)
(5)定频率控制。

$$\tilde{f}_{i,\psi}^{*,\text{VSC}} = f_{i,\psi}^{*,\text{VSC}} + \Delta f_{i,\psi}^{*,\text{VSC}}$$
(17)

SNOP一般存在4种适用场景,各场景下对应的

控制方式见表1。在正常运行情况下,SNOP两端的 VSC其中一台维持直流母线电压稳定,另一台调节 SNOP支路的传输功率^[8]。当某一侧交流配电网发 生故障时,故障端的VSC向另外一侧交流配电网发 电,作为平衡电源向孤岛系统供电(其电压相位作为 系统的相位参考点);非故障端的VSC保障系统不间 断供电。

表1 SNOP的控制方式 Table 1 Control modes of SNOP

| 情况 - | VSC 控 | 制方式 | 迁田坛垦 |
|------|------------|------------|-------------|
| | <i>i</i> 侧 | <i>j</i> 侧 | 迫用切泉 |
| 1 | (1),(2) | (2),(3) | 正常运行 |
| 2 | (1),(4) | (3),(4) | 正常运行 |
| 3 | (4)(5) | (2),(3) | i 侧交流系统发生故障 |
| 4 | (4) (5) | (3) (4) | ; 侧 |

B-DSTATCOM中由直流电容和电池储能分别提供直流电压和电流,通过控制VSC实现潮流的四象限运行,实现有功及无功的综合调控^[5],其控制方式见表2。而DSTATCOM既能够稳定直流母线电压,又能够调节交流侧的无功功率或稳定交流母线电压,因此仅含情况3、4。

表2 B-DSTATCOM的控制方式

Table 2 Control modes of B-DSTATCOM

| 情况 | VSC 控制方式 | 适用场景 |
|----|----------|------|
| 1 | (1)(2) | 正常运行 |
| 2 | (1)(4) | 正常运行 |
| 3 | (2)(3) | 正常运行 |
| 4 | (2)(4) | 正常运行 |

本文将加权最小绝对值状态估计问题描述为直 角坐标系下具有二次量测方程及约束条件的优化函 数模型。由于原对偶内点法具有计算效率高和求解 稳定性高的特点^[17],利用该方法求解满足约束条件 的目标函数及量测方程并得到雅可比矩阵及海森 矩阵。

与传统配电网的状态估计相比,柔性配电网的 状态估计需要综合考虑配电网的网络模型、柔性配 电设备模型和各物理量的量测量特征,建立相应的 量测方程以处理系统内不同类型、精度、时间尺度的 量测量,保证状态估计中量测的冗余度和估计结果 的准确性。由此本文以柔性配电设备中VSC的三相 基波电压和直流电压为状态变量,并引入柔性配电 设备所在支路两端的交流侧节点注入功率量测、传 输功率量测量以及VSC的直流侧电压量测量。同时 为提高柔性配电网状态估计的准确度,在所建模型 中需考虑柔性配电设备的传输损耗和不同控制方式 下的伪量测方程。

综上所述,通过引入柔性配电设备精确的量测 数据和相应的量测方程,提高了状态估计的冗余度 和估计结果的精确度,拓展了柔性配电网的状态估 计范围,有效监测了柔性配电设备的实时运行状态, 为柔性配电网的态势感知和全域实时控制奠定了 基础。

3 算例分析

根据所提状态估计模型,利用 MATLAB 2018a 软件设计考虑 SNOP、DSTATCOM 和 B-DSTATCOM 传输功率损耗及控制方式的柔性配电网状态估计程 序。为验证所建模型的正确性和有效性,对文献 [10]中 IEEE 33节点柔性配电网算例进行修改,并 对修改后的算例进行仿真验证,修改后的测试系统 拓扑结构见图4。测试系统中换流器的损耗系数及 具体参数参见文献[18],算例系统的参数设置见附 录表A1—A4。程序中采用 OPTI 库建立状态估计模 型,调用 IPOPT 求解器中的原对偶内点法对问题进 行求解,设计算收敛精度为10°。算例采用全量测 模式,所配置的量测数据均基于潮流计算真值添加 随机误差,设随机误差的标准差(标幺值)为真值的 1%。



图4 IEEE 33 节点测试系统拓扑结构

Fig.4 Topology structure of IEEE 33-bus test system

设计如下3种场景(其设定值如附录表A5所示),验证所提模型对不同控制方式的适用性及正确性:①SNOP支路中VSC₁采用控制方式(3)、(4), VSC₂采用控制方式(1)、(2),不考虑B-DSTATCOM 以及DSTATCOM的控制方式;②SNOP支路中VSC₁ 采用控制方式(1)、(4),VSC₂和DSTATCOM均采用 控制方式(3)、(4),不考虑B-DSTATCOM的控制方 式;③SNOP支路中VSC₁采用控制方式(1)、(2), VSC₂采用控制方式(2)、(3),DSTATCOM采用控制 方式(2)、(3),B-DSTATCOM采用控制方式(1)、(4)。

根据上述设置对柔性配电网状态估计的有效性 进行定量分析。设状态估计的计算效率性能指标为 平均计算时间 \bar{T}_s ;设状态估计的滤波性能指标^[19]为 量测误差统计值 S_1 、估计误差统计值 S_2 以及目标函 数统计值J',如式(18)所示;设状态估计的估计精度 指标^[20]为平均估计误差 S_3 和平均最大估计误差 S_4 , 如式(19)所示。

$$\begin{cases} S_{1} = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^{T} \left[\frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} \left(\frac{\tilde{z}_{i,k} - \tilde{z}_{i,k}^{\text{TURE}}}{R_{ii}} \right)^{2} \right]^{\frac{1}{2}} \\ S_{2} = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^{T} \left[\frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} \left(\frac{h_{i,k}(\boldsymbol{x}) - \tilde{z}_{i,k}^{\text{TURE}}}{R_{ii}} \right)^{2} \right]^{\frac{1}{2}} \\ J' = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^{T} \sum_{i=1}^{m} \left(\frac{\tilde{z}_{i,k} - h_{i,k}(\boldsymbol{x})}{R_{ii}} \right)^{2} \\ \begin{cases} S_{3} = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^{T} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} |\boldsymbol{x}_{i,k} - \boldsymbol{x}_{i,k}^{\text{TURE}} | \right) \\ S_{4} = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^{T} \max_{i=1,2,\cdots,n} |\boldsymbol{x}_{i,k} - \boldsymbol{x}_{i,k}^{\text{TURE}} | \end{cases} \end{cases}$$
(19)

其中,T为状态估计总次数;ž_{ik}为第k次状态估计中 第i维量测向量的量测值; zīthe 为第k次状态估计中 第*i*维量测向量的潮流真值;*R*_a为权重系数矩阵所 对应的第i维量测向量的权重系数; $h_{i,k}(\mathbf{x})$ 为第k次 状态估计中i维量测方程的结果; x_{ik} 为第k次状态估 计中第i维状态变量的估计结果;x_{i,k}^{TURE}为第i维状态 变量的真值。

设T=100,不同场景下的性能指标对比结果见 表3。表中,S₁-S₄和J'均为标幺值,后同。

表3 不同场景的性能指标对比

Table 3 Comparison of performance index under different cases

| 场景 | S_1 | S_2 | J' | S_3 | S_4 | $\overline{T}_{\rm s}/{\rm ms}$ |
|----|--------|--------|--------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------|
| 1 | 1.0047 | 0.7343 | 4.3222 | 2.18×10 ⁻³ | 1.42×10^{-2} | 27.68 |
| 2 | 1.0012 | 0.6915 | 4.1470 | 2.00×10 ⁻³ | 1.48×10^{-2} | 26.65 |
| 3 | 1.0047 | 0.9084 | 4.9410 | 2.38×10 ⁻³ | 1.94×10 ⁻² | 30.88 |

对比3种场景下 S_1 、 S_2 和J'的参数值,根据文献 [19]可知, $S_1 \approx 1$ p.u. 说明模型采用的量测方程和约 束条件符合柔性配电网状态估计的滤波要求;S₂< 1 p.u., 且 J' 接近所设置量测量个数的冗余度, 表明 所建状态估计模型的滤波效果良好。另外,3种场 景的滤波性能指标均无明显变化,表明不同场景下 SNOP、DSTATCOM及 B-DSTATCOM 的控制方式不 同,对柔性配电网状态估计滤波效果无影响。对比 3种场景下的S₃、S₄可知,S₃均小于2.5×10⁻³ p.u.,S₄ 均小于2×10⁻² p.u.,这证明了所提方法满足工程实 践的精度,所建柔性配电网状态估计模型具有一定的 有效性和实用性。此外,3种场景的估计精度指标 均无明显变化,说明不同场景下 SNOP、DSTATCOM 及B-DSTATCOM的控制方式不同,对柔性配电网状 态估计的估计精度无影响。对比3种场景下 \overline{T} 的 值, \overline{T} ,均小于32 ms,这证明了所提方法可以满足工 程实践的计算性能要求,保证了计算方法的高效性和 实用性。

计及设备传输功率损耗前、后不同场景下传

输功率的估计误差见表4。表中, $\Delta P^{s, DC}$ 、 $\Delta P^{Ds, DC}$ 、 ΔP^{BDS, DC}分别为SNOP、DSTATCOM及B-DSTATCOM 的直流传输功率估计误差,均为标幺值。由表4可 知,考虑配电网柔性设备的传输功率损耗前、后,计 算不同场景下各设备直流传输功率估计误差的相对 误差,其值均超过2%。这证明了不同控制方式下 计及设备传输功率损耗后,提高了柔性配电网状态 估计模型的精确度。

表4 不同场景下直流传输功率的估计误差

Table 4 Estimation error of DC transmission power

under different cases

| | ΔP | S, DC | ΔP^{I} | DS, DC | $\Delta P^{ m BDS, DC}$ | | |
|----|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|--|
| 场景 | 考虑 损耗 | 不考虑 损耗 | 考虑 损耗 | 不考虑 损耗 | 考虑 损耗 | 不考虑 损耗 | |
| 1 | 2.09×10^{-2} | 2.05×10^{-2} | _ | _ | _ | _ | |
| 2 | 1.91×10^{-2} | 1.87×10^{-2} | 3.17×10^{-5} | 3.93×10^{-6} | _ | _ | |
| 3 | 1.96×10 ⁻² | 1.93×10 ⁻² | 3.39×10 ⁻⁴ | 3.11×10 ⁻⁴ | 1.94×10 ⁻² | 1.90×10 ⁻² | |

为进一步测试不同数量的不良数据对算法辨识 能力和计算效率的影响,分别在场景②的量测数据 中添加0、50、100、150个不良数据,采用以下3种方 法求解:①基于正交变换的加权最小二乘法;②基于 正则方程的加权最小二乘法;③本文方法。所得结 果见表5。

表5 场景②中不同算法的辨识能力和计算效率

Table 5 Discrimination ability and calculation effic:

| fficiency | of | different | algorithms | ın | Case | (2) |
|-----------|----|-----------|------------|----|------|-----|
|-----------|----|-----------|------------|----|------|-----|

| 不良数据 个数 | 方法 | S_3 | S_4 | $\overline{T}_{\rm s}/{\rm ms}$ | 平均迭代 次数 |
|------------|----|-----------------------|-----------------------|---------------------------------|------------|
| | 1 | 1.83×10 ⁻³ | 1.43×10 ⁻² | 6.64 | 4 |
| 0 | 2 | 1.83×10^{-3} | 1.43×10 ⁻² | 12.12 | 3 |
| | 3 | 2.11×10 ⁻³ | 1.55×10^{-2} | 37.11 | 18 |
| | | 2.18×10 ⁻³ | 2.51×10^{-2} | 15.10 | 5 |
| 50 | 2 | 4.15×10 ⁻³ | 3.98×10^{-2} | 13.42 | 4 |
| | 3 | 2.37×10 ⁻³ | 2.41×10^{-2} | 37.60 | 18 |
| | 1 | 4.07×10^{-3} | 3.94×10 ⁻² | 20.89 | 5 |
| 100 | 2 | 7.29×10 ⁻³ | 5.19×10 ⁻² | 13.56 | 4 |
| | 3 | 3.94×10 ⁻³ | 3.86×10 ⁻² | 38.01 | 18 |
| | 1 | 4.28×10 ⁻³ | 7.23×10 ⁻² | 27.27 | 6 |
| 150 | 2 | 8.64×10 ⁻³ | 6.31×10 ⁻² | 13.74 | 4 |
| | 3 | 4.38×10 ⁻³ | 5.82×10 ⁻² | 37.47 | 18 |

对比3种方法中S3、S4参数值可知,当量测数据 中无不良数据时,方法①、②中S3、S4基本相同,且分 别低于方法③中的参数值,说明此时方法①、②的计 算精度较高。随着不良数据的增加,方法①、②中 S_3 、 S_4 均明显增加,而方法③中 S_3 、 S_4 增加幅度最小。 这说明本文所提方法的抗差能力更好,保证柔性配 电网的状态估计在工程实践环节中具有更高的精度 和可靠性。

对比3种方法中的 \overline{T} 和平均迭代次数可知,当 量测中无不良数据时,方法①采用正交变换,产生的 海森矩阵规模最小,计算效率较高,平均计算时间最

小,但相对方法②其迭代次数较高。当量测中存在 不良数据时,随着不良数据的增加,方法②、③的 \overline{T}_s 和平均迭代次数基本不变,而方法①的 \overline{T}_s 和平均迭 代次数均明显提高。这是由于方法①每次迭代都需 要对不良数据进行逐一辨识, \overline{T}_s 和平均迭代次数均 会随着不良数据个数的增多而增多;而方法②中无 不良数据辨识环节,不良数据的增加对 \overline{T}_s 并无影 响,但其精度降低的速度最快;方法③中 \overline{T}_s 和平均 迭代次数与不良数据的数量无关,能高效地抑制不 良数据的影响。因此本文所提方法中 \overline{T}_s 与不良数 据数量无关,保证柔性配电网的状态估计在工程实 践环节中具有更高的效率。

附录中表A6给出了场景③中柔性配电网三相 电压的状态估计结果。由表可知,所提模型能计及 柔性配电网的三相不平衡特性,可以准确地估计三 相电压的实时状态,满足柔性配电网运行控制的实 时性、有效性。

4 结论

本文针对 SNOP、DSTATCOM 及 B-DSTATCOM 逐渐应用于柔性配电网的现状,提出了考虑各设备 传输功率损耗的柔性配电网状态估计模型,考虑柔 性配电设备及柔性配电网的三相不平衡特性,进一 步给出其稳态潮流量测方程、控制伪量测方程和等 式约束。算例验证了状态估计模型对采用不同控制 方式的 SNOP、DSTATCOM 及 B-DSTATCOM 适用性, 以及考虑其传输功率损耗的必要性。此外,采用实 用型加权最小绝对值法求解状态估计模型,进一步 保证了所建模型在工程应用的可靠性和实用性。

本文采用的状态估计方法为集中式状态估计算法,未来进一步研究基于交替方向乘子法的分布式 状态估计算法。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1]肖峻,刚发运,邓伟民,等. 柔性配电网的安全域模型[J]. 电网技术,2017,41(12):3764-3771.
 XIAO Jun, GANG Fayun, DENG Weimin, et al. Security region model for flexible distribution network[J]. Power System Technology,2017,41(12):3764-3771.
- [2] SHAFIK M B, CHEN H K, RASHED G I, et al. Adequate topology for efficient energy resources utilization of active distribution networks equipped with soft open points[J]. IEEE Access, 2019, 7:99003-99016.
- [3] 胡玉,顾洁,马睿,等.面向配电网弹性提升的智能软开关鲁棒 优化[J].电力自动化设备,2019,39(11):85-91.
 HU Yu,GU Jie,MA Rui, et al. SNOP robust optimization for distribution network resilience enhancement[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(11):85-91.
- [4] 吴忠强,赵立儒,贾文静,等. 计及DG与STATCOM的配电网重 构优化策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(1):111-116,122.

WU Zhongqiang, ZHAO Liru, JIA Wenjing, et al. Optimal reconfiguration of distribution network with DG and STATCOM [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(1):111-116,122.

[5] 刘欢欢,符杨,苏向敬,等.带蓄电池储能系统的DSTATCOM 有功无功联合优化控制[J].电力系统自动化,2020,44(1): 134-141.

LIU Huanhuan, FU Yang, SU Xiangjing, et al. Joint optimization control of active and reactive power for DSTATCOM with battery energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1):134-141.

- [6] OUYANG S D, LIU J J, YANG Y, et al. DC voltage control strategy of three-terminal medium-voltage power electronic transformer-based soft normally open points[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(5): 3684-3695.
- [7] 姜子健,杨欢,沈建辉,等.基于级联延时信号消除-锁相环算 法的配电网静止同步补偿器控制策略[J].电网技术,2015,39 (7):1989-1994.
 JIANG Zijian, YANG Huan, SHEN Jianhui, et al. DSTATCOM

control strategy based on cascaded delayed signal cancellation phase locked loop algorithm[J]. Power System Technology, 2015,39(7):1989-1994.

- [8] 孙充勃,李鹏,王成山,等. 含多直流环节的混合结构有源配电 网潮流计算方法[J]. 电力系统自动化,2015,39(21):59-65.
 SUN Chongbo,LI Peng,WANG Chengshan, et al. A novel power flow algorithm for active distribution system with multiple DC components[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015,39(21):59-65.
- [9] 王志强,方正,刘文霞,等. 基于概率多场景的柔性配电网鲁棒运行优化[J]. 电力自动化设备,2019,39(7):37-44.
 WANG Zhiqiang,FANG Zheng,LIU Wenxia, et al. Robust operation optimization of flexible distribution network based on probabilistic multi-scenario[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(7):37-44.
- [12] 王鹏,陈蕾,陈艳波,等.一种适应于配电网的交叉逼近状态估 计方法[J].电力自动化设备,2019,39(12):102-107.
 WANG Peng, CHEN Lei, CHEN Yanbo, et al. Cross approximation state estimation method for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(12):102-107.
- [13] 周佳伟,卫志农,孙国强,等.基于复数域标幺化的配电网三相 不对称快速分解状态估计算法[J].电力自动化设备,2017,37
 (3):13-18,25.
 ZHOU Jiawei,WEI Zhinong,SUN Guoqiang, et al. Fast decoupled state-estimation algorithm based on complex normaliza-

pled state-estimation algorithm based on complex normalization for three-phase asymmetrical distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3):13-18, 25.

- [14] 巨云涛,林毅,王晶,等.考虑分布式电源详细模型的配电网多 相状态估计[J].电力系统保护与控制,2016,44(23):147-152.
 JU Yuntao,LIN Yi,WANG Jing, et al. Multi-phase distribution state estimation considering detailed models of distributed generators[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44 (23):147-152.
- [15] 方治,宋绍剑,林予彰,等.含光伏电站和蓄电池储能系统的主动配电系统状态估计[J].电力系统自动化,2019,43(13):71-79.
 FANG Zhi,SONG Shaojian,LIN Yuzhang, et al. State estimation for active distribution systems incorporating photovoltaic plant and battery energy storage system[J]. Automation of Elec-
- tric Power Systems, 2019, 43(13):71-79.
 [16] BLOEMINK J M, GREEN T C. Increasing distributed generation penetration using soft normally-open points[C]//IEEE PES General Meeting. Providence, RI, USA: IEEE, 2010:1-8.
- [17] 朱鹏程,柳劲松,范士雄,等.考虑混合量测的配电网二次约束

二次估计方法[J]. 电网技术,2019,43(3):841-847.

ZHU Pengcheng, LIU Jinsong, FAN Shixiong, et al. A quadratic constraint quadratic estimation method based on hybrid measurements for distribution networks [J]. Power System Technology, 2019, 43(3):841-847.

[18] 和敬涵,李智诚,王小君,等. 计及换流器损耗与电压下垂控制的交直流系统最优潮流算法[J]. 电力系统自动化,2017,41 (22):48-55.

HE Jinghan, LI Zhicheng, WANG Xiaojun, et al. Optimal power flow algorithm for hybrid AC / DC power systems considering power loss of converter and voltage-droop control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(22):48-55.

- [19] 孙国强,李育燕,卫志农,等.含VSC-HVDC的交直流混合系统 状态估计[J].电力自动化设备,2010,30(9):6-12,23.
 SUN Guoqiang, LI Yuyan, WEI Zhinong, et al. State estimation of power system with VSC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(9):6-12,23.
- [20] 马鑫,郭瑞鹏,柳劲松,等. 三相不平衡下交直流配电网状态估

计[J]. 电力系统自动化,2019,43(23):65-71.

MA Xin, GUO Ruipeng, LIU Jinsong, et al. State estimation for three-phase unbalanced AC / DC distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23):65-71.

作者简介:



马 鑫(1994—),男,宁夏银川人,工 程师,硕士,通信作者,从事电力系统仿真 计算、电力系统运行优化和状态估计方面 的研究工作(E-mail:309480591@qq.com); 田 蓓(1977—),女,宁夏银川人,高 级工程师,硕士,从事电力系统自动化方面 的研究工作(E-mail:babyqi0203@163.com); 李宏强(1990—),男,宁夏中卫人,高

级工程师,硕士,从事电力系统仿真计算方面的研究工作(E-mail:lhq1652@126.com)。

(编辑 王欣竹)

State estimation of flexible distribution network considering power transmission loss and control modes of SNOP, DSTATCOM and B-DSTATCOM

MA Xin^{1,2}, TIAN Bei^{1,2}, LI Hongqiang^{1,2}, XUE Fei^{1,2}, HUANG Yongning¹, ZHANG Hanhua^{1,2}, WU Meirong^{1,2}

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Ningxia Electric Power Company, Yinchuan 750002, China;

2. Key Laboratory of Ningxia Electrical Power Energy Security, Yinchuan 750002, China)

Abstract: With the investment of SNOP(Soft Normally Open Point), DSTATCOM(Distributed STATic synchronous COMpensator) and other novel typed distributed equipment, there is a great need to achieve accurate state estimation for the flexible distribution network with SNOP and DSTATCOM. Firstly, the state estimation model of distribution network based on the weighted minimum absolute value method is constructed. Secondly, the state estimation model of the flexible distribution network is proposed, which considers the influence of power transmission loss and various control modes of SNOP, DSTATCOM and B-DSTATCOM(DSTATCOM with Battery energy storage system). Furthermore, the measurement equation, control pseudo measurement equation and constraint conditions are given to ensure the observability requirement. Finally, the effectiveness and practicability of the proposed method are verified on the IEEE 33-bus flexible distribution network test system. The test results prove the applicability of the proposed state estimation model to various control modes of SNOP, DSTATCOM and B-DSTATCOM and B-DSTATCOM, and the necessity of considering the power transmission loss.

Key words: SNOP; DSTATCOM; state estimation; distribution network; power transmission loss; control mode

| 附 录 |
|--------------------------|
| 表 A1 交流节点的负荷 |
| Table A1 Load of AC node |

| 士政 | 首端 | 末端 | | | 支路网 | 且抗/Ω | | | Ŕ | 卡端节点负荷 | 苛 |
|----|----|----|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------|---------|---------|
| 又峭 | 节点 | 节点 | Z_{aa} | $Z_{ m bb}$ | Z_{cc} | $Z_{ab} = Z_{ba}$ | $Z_{ac} = Z_{ca}$ | $Z_{bc} = Z_{cb}$ | a 相 | b 相 | c 相 |
| 1 | 1 | 2 | 0.093 5+j0.047 7 | 0.093 3+j0.047 5 | 0.093 1+j0.047 4 | 0.000 9+j0.000 4 | 0.001 3+j0.000 7 | 0.001 1+j0.000 5 | 32+j19 | 33+j20 | 35+j21 |
| 2 | 2 | 3 | 0.500 3+j0.254 8 | 0.498 9+j0.254 1 | 0.497 9+j0.253 6 | 0.004 9+j0.002 5 | 0.007 3+j0.003 7 | 0.005 9+j0.003 0 | 30+j13 | 31+j15 | 29+j13 |
| 3 | 3 | 4 | 0.371 4+j0.189 1 | 0.370 4+j0.188 6 | 0.369 6+j0.188 2 | 0.003 6+j0.001 8 | 0.005 4+j0.002 7 | 0.004 3+j0.002 2 | 45+j30 | 0+j0 | 35+j24 |
| 4 | 4 | 5 | 0.386 8+j0.197 0 | 0.385 6+j0.196 4 | 0.384 9+j0.196 0 | 0.003 8+0.001 9 | 0.005 7+j0.002 9 | 0.004 5+j0.002 3 | 20+j10 | 20+j10 | 20+j10 |
| 5 | 5 | 6 | 0.831 2+j0.717 6 | 0.828 8+j0.715 4 | 0.827 1+j0.714 0 | 0.008 1+j0.007 0 | 0.012 2+j0.010 6 | 0.009 8+j0.008 4 | 20+j6 | 20+j7 | 20+j7 |
| 6 | 6 | 7 | 0.190 0+j0.628 0 | 0.189 4+j0.626 2 | 0.189 0+j0.624 9 | 0.001 8+j0.006 1 | 0.002 8+j0.009 2 | 0.002 2+j0.007 4 | 65+j33 | 70+j34 | 65+j33 |
| 7 | 7 | 8 | 0.722 0+j0.238 6 | 0.719 9+j0.237 9 | 0.718 5+j0.237 4 | 0.007 1+j0.002 3 | 0.010 6+j0.003 5 | 0.008 5+j0.002 8 | 70+j34 | 65+j33 | 65+j33 |
| 8 | 8 | 9 | 1.045 4+j0.751 0 | 1.042 3+j0.748 8 | 1.040 3+j0.747 3 | 0.010 3+j0.007 4 | 0.015 4+j0.011 0 | 0.012 3+j0.008 8 | 20+j7 | 18+j6 | 22+j7 |
| 9 | 9 | 10 | 1.059 6+j0.751 0 | 1.056 5+j0.748 8 | 1.054 4+j0.747 3 | 0.010 4+j0.007 4 | 0.015 6+j0.011 0 | 0.012 5+j0.008 8 | 21+j7 | 20+j7 | 0+j0 |
| 10 | 10 | 11 | 0.199 5+j0.065 9 | 0.198 9+j0.065 7 | 0.198 5+j0.065 6 | 0.001 9+j0.000 6 | 0.002 9+j0.000 9 | 0.002 3+j0.000 7 | 14+j9 | 16+j11 | 15+j10 |
| 11 | 11 | 12 | 0.380 0+j0.125 6 | 0.378 8+j0.125 2 | 0.378 1+j0.125 0 | 0.003 7+j0.001 2 | 0.005 6+j0.001 8 | 0.004 4+j0.001 4 | 20+j11 | 20+j12 | 20+j12 |
| 12 | 12 | 13 | 1.490 0+j1.172 3 | 1.485 6+j1.168 8 | 1.482 6+j1.166 5 | 0.014 6+j0.011 5 | 0.022 0+j0.017 3 | 0.017 6+j0.013 8 | 21+j12 | 19+j11 | 20+j12 |
| 13 | 13 | 14 | 0.549 7+j0.723 5 | 0.548 0+j0.721 4 | 0.547 0+j0.720 0 | 0.005 4+j0.007 1 | 0.008 1+j0.010 6 | 0.006 4+j0.008 5 | 40+j28 | 38+j27 | 42+j25 |
| 14 | 14 | 15 | 0.599 8+j0.533 8 | 0.598 0+j0.532 3 | 0.596 9+j0.531 2 | 0.005 9+j0.005 2 | 0.008 8+j0.007 8 | 0.007 0+j0.006 3 | 0+j0 | 19+j3 | 20+j3 |
| 15 | 15 | 16 | 0.751 4+j0.553 1 | 0.749 1+j0.551 5 | 0.747 7+j0.550 4 | 0.007 4+j0.005 4 | 0.011 1+j0.008 1 | 0.008 8+j0.006 5 | 19+j6 | 20+j7 | 21+j7 |
| 16 | 16 | 17 | 1.308 3+j1.746 8 | 1.304 4+j1.741 6 | 1.301 8+j1.738 2 | 0.012 8+j0.017 2 | 0.019 3+j0.025 8 | 0.015 4+j0.020 6 | 19+j6 | 21+j7 | 20+j7 |
| 17 | 17 | 18 | 0.742 9+j0.582 6 | 0.740 7+j0.580 8 | 0.739 3+j0.579 7 | 0.007 3+j0.005 7 | 0.010 9+j0.008 6 | 0.008 7+j0.006 8 | 30+j14 | 30+j13 | 30+j13 |
| 18 | 2 | 19 | 0.166 4+j0.158 8 | 0.165 9+j0.158 3 | 0.165 6+j0.158 0 | 0.001 6+j0.001 5 | 0.002 4+j0.0023 | 0.001 9+j0.001 8 | 33+j15 | 29+j13 | 28+j12 |
| 19 | 19 | 20 | 1.526 7+j1.375 7 | 1.522 2+j1.371 6 | 1.519 2+j1.368 9 | 0.015 0+j0.013 5 | 0.022 5+j0.020 3 | 0.018 0+j0.016 2 | 29+j13 | 28+j12 | 33+j15 |
| 20 | 20 | 21 | 0.415 6+j0.485 5 | 0.414 4+j0.484 1 | 0.413 5+j0.483 1 | 0.004 0+j0.004 7 | 0.006 1+j0.007 1 | 0.004 9+j0.005 7 | 29+j12 | 30+j13 | 31+j15 |
| 21 | 21 | 22 | 0.719 5+j0.951 3 | 0.717 4+j0.948 5 | 0.715 9+j0.946 6 | 0.007 0+j0.009 3 | 0.010 6+j0.014 0 | 0.008 5+j0.011 2 | 28+j12 | 33+j15 | 29+j13 |
| 22 | 3 | 23 | 0.457 9+j0.312 9 | 0.456 6+j0.311 9 | 0.455 7+j0.311 3 | 0.004 5+j0.003 0 | 0.006 7+j0.004 6 | 0.005 4+j0.003 6 | 30+j16 | 31+j17 | 29+j17 |
| 23 | 23 | 24 | 0.911 4+j0.719 7 | 0.908 7+j0.717 6 | 0.906 9+j0.716 1 | 0.008 9+j0.007 0 | 0.013 4+j0.010 6 | 0.010 7+j0.008 5 | 130+j60 | 140+j70 | 150+j70 |
| 24 | 24 | 25 | 0.909 4+j0.711 6 | 0.906 7+j0.709 5 | 0.904 9+j0.708 1 | 0.008 9+j0.007 0 | 0.013 4+j0.010 5 | 0.010 7+j0.008 4 | 150+j70 | 130+j70 | 140+j60 |
| 25 | 6 | 26 | 0.206 0+j0.104 9 | 0.205 4+j0.104 6 | 0.205 0+j0.104 4 | 0.002 0+j0.001 0 | 0.003 0+j0.001 5 | 0.002 4+j0.104 4 | 20+j8 | 20+j8 | 20+j9 |
| 26 | 26 | 27 | 0.288 4+j0.146 8 | 0.287 6+j0.146 4 | 0.287 0+j0.146 1 | 0.002 8+j0.001 4 | 0.004 2+j0.002 1 | 0.003 4+j0.001 7 | 18+j7 | 22+j9 | 20+j9 |
| 27 | 27 | 28 | 1.074 8+j0.947 7 | 1.071 7+j0.944 9 | 1.069 5+j0.943 0 | 0.010 5+j0.009 3 | 0.015 8+j0.014 0 | 0.012 7+j0.011 2 | 19+j6 | 22+j8 | 19+j6 |
| 28 | 28 | 29 | 0.816 2+j0.711 1 | 0.813 8+j0.709 0 | 0.812 2+j0.707 6 | 0.008 0+j0.007 0 | 0.012 0+j0.010 5 | 0.009 6+j0.008 4 | 38+j23 | 42+j25 | 40+j22 |
| 29 | 29 | 30 | 0.515 1+j0.262 3 | 0.513 5+j0.261 6 | 0.512 5+j0.261 0 | 0.005 0+j0.002 5 | 0.007 6+j0.003 8 | 0.006 0+j0.003 1 | 60+j180 | 70+j210 | 70+j210 |
| 30 | 30 | 31 | 0.989 0+j0.977 4 | 0.986 0+j0.974 5 | 0.984 1+j0.972 6 | 0.009 7+j0.009 6 | 0.014 6+j0.014 4 | 0.011 6+j0.011 5 | 45+j20 | 51+j23 | 54+j27 |
| 31 | 31 | 32 | 0.315 1+j0.363 7 | 0.314 2+j0.366 2 | 0.313 6+j0.365 5 | 0.003 1+j0.003 6 | 0.004 6+j0.005 4 | 0.003 7+j0.004 3 | 70+j33 | 72+j35 | 68+j32 |
| 32 | 32 | 33 | 0.346 1+j0.538 1 | 0.345 0+j0.536 5 | 0.344 4+j0.535 5 | 0.003 4+j0.005 3 | 0.005 1+j0.007 9 | 0.004 0+j0.006 3 | 20+j13 | 20+j14 | 20+j13 |

注:末端节点负荷单位为 kW、kvar。

表 A2 SNOP 参数 Table A2 Parameters of SNOP

| | | | Tuble 11 | r druinieters or b | liei | | | |
|---------|-------------------|-------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|-------|---------|-----------|
| 所连的交流节点 | 等值电抗 X_r/Ω | 等值电阻 R_r/Ω | 并联电纳 B _f /Ω | 换流变电杭 X _{tr} /Ω | 换流变电阻 R _{tr} /Ω | 常数损耗 | 线性损耗系数 | 二次损耗系数 |
| 33 | 0.164 3 | 0.000 1 | 0.088 7 | 0.112 1 | 0.001 5 | 0.103 | 0.001 5 | 0.001 200 |
| 18 | 0.164 3 | 0.000 1 | 0.088 7 | 0.112 1 | 0.001 5 | 0.103 | 0.001 5 | 0.000 808 |
| | | | | | | | | |

注:常数损耗、线性损耗系数、二次损耗系数为标幺值,后同。

| | 所连的る | を流节点 等 | 值电抗 | X_r/Ω | 等值电阻。 | R_r/Ω 并 | 联电线 | 纳 <i>B</i> _f /Ω 换 | 流变电 标 | $X_{\rm rr}/\Omega$ 换流 | ·M 变电阻 R _{tr} /Ω | 常数损耗 | 毛线性损耗 | 系数二 | 二次损耗 | 毛系数 |
|----------|---------------------------------------|-----------|----------|--------------------|------------------------|--------------------------|------------------|------------------------------|------------------------------|---|------------------------------|-----------------------|---------------------|-------|-------|-----------|
| | 1 | 2 | 0.164 | 3 | 0.000 | 1 | 0.08 | 8 7 | 0.112 | 1 | 0.001 5 | 0.103 | 0.001 | 5 | 0.000 | 808 |
| | | | | | | | | 表 A4 B-I | OSTATC | OM 参数 | | | | | | |
| | | | | | | Т | able | A4 Param | eters of | B-DSTATC | ОМ | | | | | |
| | 所连的交 | を流节点 等 | 值电抗 | $X_{\rm r}/\Omega$ | 等值电阻。 | R _r /Ω 并 | 联电线 | 纳 B _f /Ω 换 | 流变电材 | ī <i>X</i> tr/Ω 换流 | 变电阻 R_{tr}/Ω | 常数损耗 | 毛 线性损耗 | 系数二 | 二次损耗 | 毛系数 |
| | | 3 | 0.164 | 3 | 0.000 | 1 | 0.08 | 87 | 0.112 | 1 | 0.001 5 | 0.103 | 0.001 | 5 | 0.000 | 808 |
| | | | | | 表。 | A5 SNC | DP、I | DSTATCON | A B-DS | STATCOM # | 空制方式设置 | TITCO | | | | |
| | | | | 1a | ble A5 Co | ontrol m | ethoo | 1 setting o | f SNOP, | 」 DSTATCO | M and B-DS | TAICON | 4 | | | |
| | | 场 | 景 - | SNO | P 所在支助 | VSC. | SN | OP 斫在支 | 投車 路 VSC。 | 前方式 DST | TATCOM | B | DSTATCO | M | | |
| | | | ~ | (3 | 3) | (4) | 514 | (1) | (2) | | | Б | DBIMCO | | | |
| | | (| 1) | V _{dc} = | 1.00 V _a | c=0.94 | $P_{\rm ac}$ | c=-0.2 | $2_{\rm ac} = -0.2$ | | | | | _ | | |
| | | (| 2 | (1) $P_{ac}=$ | $() = 0.2 V_{a}$ | (4) =0.94 | V_{d} | (3) =0.94 | (4) V _{ac} =0.94 | (3) $V_{\rm dc}=0.97$ | $(4) V_{ac} = 0.95$ | _ | | _ | | |
| | | (| 3) | (1 | 1) | (2) | | (3) | (2) | (3) | (2) | (1 |) (4 | 4) | | |
| | | | - | P _{ac} = | $-0.2 Q_{\rm a}$ | c=-0.1 | | c = 1.00 (| $2_{ac} = -0.1$ | V _{dc} =0.95 | $Q_{ac} = -0.1$ | $P_{\rm ac}=-$ | $-0.2 V_{\rm ac} =$ | 0.96 | | |
| | | | | | Table A | 表 A 5 Voltad | 6功 1919 | 蒙3状态症 sult of ΔC | 5计后交 'bus aff | 流节点的电 er state est | 压结果 imation in C | ase 3 | | | | |
| | っ相 | 由臣 | | h 相 | 由臣 | o vonag | 。相 | 由臣 | | o 相 | 由臣 | use 5 h ≢ | 由臣 | | c th | 由臣 |
| 交流 节点 | ————————————————————————————————————— | 相角/ (° |)恒 | 店 | 元 <u>□</u> 相角/ (° ` | 前面有 | с л _н | 扣角/ (°) | 交流_ 、 节点 | in di | 相角/(°) | 恒估 | 相角/(°、 |) 市区 | 店 | 相角/(°) |
| 1 | 1 001 670 | 0.000.02 | × 1001 | ഥ 272 | ·120.002 | / 呼曲证 1 000 | 102 | 120 004 3 | 2 18 | 1946 055 | -3.065.22.0 | 四直 | · 123 511 | 0 944 | 山 | 116.884.8 |
| 2 | 0.999 273 | 0.008 41 | 2 0 998 | 891 | -120.002 | 0.998 | 031 | 120.004 | 19 | 0.998 777 | -0.003 04 0 | 998 301 | -120.226 | 0.997 | 509 | 120.068_3 |
| 3 | 0.988 161 | -0.067 25 | - 0.997 | 818 | -120.293 | 0.986 | 670 | 120.003 | $\frac{1}{20}$ | 0.994 990 | -0.067 71 0 | .993 968 | 3 -120.294 | 0.994 | 332 | 120.000 7 |
| 4 | 0.982 852 | -0.116 16 | 50 0.982 | 603 | -120.357 | 0.981 | 318 | 119.951 | 21 | 0.994 430 | -0.081 76 0 |).993 150 |) -120.317 | 0.993 | 666 | 119.984 6 |
| 5 | 0.977 717 | -0.168 47 | 0 0.977 | 094 | -120.425 | 0.976 | 033 | 119.894 | 3 22 | 0.994 069 | -0.102 30 0 | 0.992 402 | 2 -120.350 | 0.993 | 064 | 119.966 0 |
| 6 | 0.966 297 | -0.468 86 | 50 0.964 | 704 | -120.765 | 0.964 | 192 | 119.560 (| 5 23 | 0.984 677 | -0.108 94 0 | 0.984 257 | 7 -120.318 | 0.982 | 879 | 119.970 7 |
| 7 | 0.965 218 | -0.713 85 | 50 0.964 | 274 | -121.033 | 0.963 | 653 | 119.304 2 | 2 24 | 0.978 141 | -0.207 96 0 | .977 700 | 0 -120.386 | 0.975 | 991 | 119.878 0 |
| 8 | 0.961 541 | -0.832 39 | 0 0.960 | 823 | -121.194 | 0.960 | 371 | 119.172 | 25 | 0.974 726 | -0.257 66 0 |).974 59 6 | 5 -120.406 | 0.972 | 732 | 119.836 1 |
| 9 | 0.958 029 | -1.204 32 | 20 0.957 | 023 | -121.604 | 0.956 | 730 | 118.804 4 | 4 26 | 0.965 107 | -0.456 29 0 | 0.963 060 | 0 -120.710 | 0.963 | 474 | 119.576 0 |
| 10 | 0.954 930 | -1.583 65 | 0 0.953 | 591 | -121.990 | 0.953 | 486 | 118.442 8 | 3 27 | 0.963 563 | -0.436 26 0 | .961 228 | 3 -120.682 | 0.961 | 740 | 119.606 7 |
| 11 | 0.954 236 | -1.632 58 | 80 0.952 | 850 | -122.040 | 0.952 | 703 | 118.392 4 | 4 28 | 0.957 088 | -0.442 80 0 | 0.953 713 | 3 -120.661 | 0.954 | 292 | 119.612 6 |
| 12 | 0.953 041 | -1.729 35 | 50 0.951 | 583 | -122.137 | 0.951 | 369 | 118.295 9 | 29 | 0.952 343 | -0.431 81 0 | 0.948 283 | 3 -120.641 | 0.949 | 034 | 119.638 6 |
| 13 | 0.948 478 | -2.068 08 | 30 0.946 | 378 | -122.504 | 0.946 | 535 | 117.941 | 2 30 | 0.950 390 | -0.389 01 0 | 0.946 009 | 9 -120.587 | 0.946 | 816 | 119.697 9 |
| 14 | 0.947 383 | -2.248 65 | 50 0.944 | 993 | -122.690 | 0.945 | 492 | 117.739 (| 31 | 0.949 971 | -0.524 51 0 | 0.945 258 | 3 -120.721 | 0.946 | 410 | 119.567 7 |
| 15 | 0.946 779 | -2.395 58 | 30 0.944 | 109 | -122.833 | 0.944 | 720 | 117.589 9 | 32 | 0.950 225 | -0.559 31 0 | 0.945 661 | -120.755 | 0.946 | 709 | 119.535 2 |
| 16 | 0.945 842 | -2.560 16 | 50 0.943 | 041 | -122.990 | 0.943 | 735 | 117.429 (|) 33 | 0.951 509 | -0.570 46 0 |).946 928 | 3 -120.769 | 0.948 | 135 | 119.530 7 |
| 17 | 0.946 223 | -2.917 38 | 80 0.943 | 298 | -123.353 | 0.944 | 495 | 117.060 (|) | | | | | | | |

表 A3 DSTATCOM 参数 Table A3 Parameters of DSTATCOM

注: a、b、c相电压幅值为标幺值,后同。

表 A7 场景 3 状态估计柔性配电设备内部 VSC 的输出基波电压结果

| Table A7 V | oltage results | of VSC | s in | flexible | distribution | equipment | after | state | estimation | in | Case | 3 |
|-------------|----------------|--------|------|----------|--------------|-----------|-------|-------|------------|-----|------|---|
| 14010 11/ / | onde results | 01 100 | | | anourourou | equipment | uncer | orare | counteron | ••• | Cube | ~ |

| VSC | a 相 | 电压 | b 相 | 电压 | c相电压 | | |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|--|
| vsc | 幅值 | 相角/(°) | 幅值 | 相角/(°) | 幅值 | 相角/(°) | |
| SNOP 线路中的 VSC1 | 0.958 913 | -0.792 25 | 0.955 142 | -120.953 | 0.957 768 | 119.349 6 | |
| SNOP 线路中的 VSC ₂ | 0.942 207 | -3.317 91 | 0.938 774 | -123.737 | 0.937 989 | 116.584 2 | |
| DSTATCOM 中的 VSC | 0.954 434 | -1.902 32 | 0.951 501 | -122.225 | 0.951 521 | 118.120 2 | |
| DSTATCOM 中的 VSC | 0.959 587 | -0.263 92 | 0.959 511 | -120.822 | 0.958 838 | 119.610 8 | |