

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191579

适用于统一迭代潮流计算的扩展型“Sen”变压器模型

冯金铃, 韩松, 潘宇航

(贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 为了发展基于扩展型“Sen”变压器(Extended Sen Transformer, EST)的潮流计算理论与方法, 从简化 EST 潮流模型的角度出发, 提出了一种适用于统一迭代潮流计算的 EST 模型。首先, 根据 EST 的工作原理, 将串、并联侧绕组等效为电压源与阻抗串联组成的支路, 进而把 EST 简化为一种双电压源型等效电路。然后, 基于统一迭代法的解算思想, 并结合 EST 的电压调节、相角调节和功率调节运行模式, 建立了 EST 的稳态潮流模型。最后, 借助 Matlab 软件, 算例分析在一个修改的 IEEE6 机 30 节点系统中展开。通过比较所提模型与软件仿真所得系统节点电压幅值和相角, 二者之间偏差在合理范围内, 验证了所提模型的有效性。

关键词: 扩展型“Sen”变压器; 双电压源型等效电路; 统一迭代法; 潮流模型; 运行模式

Modelling of extended Sen transformer for a unified iterative power flow solution

FENG Jinling, HAN Song, PAN Yuhang

(School of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to develop the theories and methods for load flow calculation of a power system with the Extended Sen Transformer (EST), an EST model suitable for a unified iterative power flow solution is proposed from the perspective of simplifying the power flow model of the EST. First, according to the working principle of the EST, the series and shunt windings of the EST are both equivalent to a series-connected branch composed of a voltage source and an impedance. As a result the EST becomes an equivalent circuit of a dual voltage source. Then, based on the solution idea of the unified iterative method, a steady-state power flow model of the EST is established considering the operation modes of the EST such as the voltage regulation, phase angle regulation and independent power flow regulation. Finally, MATLAB software is used to carry out a simulation for the modified IEEE 6-machine 30-bus system. The magnitude and phase angle of the node voltages obtained through the Matlab simulation and the proposed model can reach acceptable agreement, confirming the effectiveness of the proposed model.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51567006), Program for Top Science and Technology Talents in Universities of Guizhou Province (No. 2018036) and Science and Technology Fund of Guizhou Province (No. [2019]1100).

Key words: extended Sen transformer; equivalent circuit of dual voltage source; unified iterative method; power flow model; operational modes

0 引言

随着具有间歇性、多变性、不确定性的风能和光能等可再生能源大规模的接入, 电力系统的发电调度、输电能力、潮流控制等问题越发突出^[1-7], 迫

切需要潮流控制装置改善电网潮流分布。然而, 潮流控制装置的引入改变了原有电力网络的无源线性特征, 导致无法用常规潮流计算方法求解系统潮流。因此, 有必要建立适合于潮流控制装置的稳态潮流模型。

“Sen”变压器(Sen Transformer, ST)是一种能够独立调节线路有功和无功的电磁式统一潮流控制器, 其安装成本及运行成本低于同等容量统一潮流控制器(Unified Power Flow Controller, UPFC)^[8], 且

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51567006); 贵州省普通高等学校科技拔尖人才支持计划资助(2018036); 贵州省科学技术基金项目资助(黔科合基础[2019]1100)

可靠性更高,但控制精度较低^[9-11]。继而文献[12-13]提出了由大容量 ST 与小容量 UPFC 串联构成的新型混合式潮流控制器,对改善现有换流器型潮流控制装置的经济性以及电磁式潮流控制装置的灵活性具有重要应用价值,但两类不同技术原理的协调控制较复杂。进而文献[14-15]提出了一种基于传统 ST 串联变压器副边各子绕组反相的潮流控制装置 EST,其提高了传统 ST 的控制精度,扩大了控制域,且控制过程简单。针对此类非换流器型潮流控制器的建模,文献[16]建立了 ST 的线路潮流实时仿真模型,考虑了铁芯的非线性磁特性和各绕组间的耦合关系,但其忽略了由铁芯的几何形状、磁通路径造成的影响。进而文献[17]基于 ST 的非线性等效磁路,考虑了铁芯磁滞、涡流损耗等因素影响,建立了 ST 的非线性磁特性实时仿真模型,使 ST 模型更加精确。文献[16-17]都是根据 ST 内部的电路联系与磁路耦合,建立了 ST 的电磁暂态模型,但是建模过程复杂、计算量大,不适用于对装置进行稳态研究。文献[18-19]建立了基于附加节点功率注入法的 UPFC 模型,将电网与装置变量分开,无需考虑初值,但是忽略了装置结构和控制特性^[20]。文献[21]采用解耦法,其易在常规的潮流算法中实现,但控制参数是在收敛后计算的,当发现参数越限,需重新调整控制目标计算^[20]。因此,文献[22]采用统一迭代法建立了晶闸管辅助型 ST 的潮流模型,将装置的内部功率平衡方程、潮流控制目标和电网各节点功率平衡方程进行统一迭代。然而,目前还没有相关文献研究 EST 的稳态模型,所以,开展适用于 EST 的电力系统潮流计算模型的研究是很有必要的。

因此,本文从简化 EST 潮流模型角度出发,将 EST 简化为一种双电压源型等效电路,建立了一种适用于统一迭代潮流计算的 EST 模型。在 Matlab/Simulink 仿真软件中搭建了一个含 EST 修改的 IEEE6 机 30 节点系统模型,通过比较文中所提模型与仿真得出的系统各节点电压幅值和相角,验证了所提模型的有效性。

1 EST 的工作原理

EST 的一次侧由三个绕组星型连接,并联接入系统送端母线,构成励磁单元。励磁单元副边每相由三个带抽头的绕组和配套的电力电子开关组件 TP 组成^[14-15]。其中,副边的三个绕组,分别与自身相和另两相原边磁耦合。与 ST 相比,EST 利用电力电子开关组件 TP 实现了传统 ST 串联变压器副边绕组反相。其详细结构如图 1 所示。

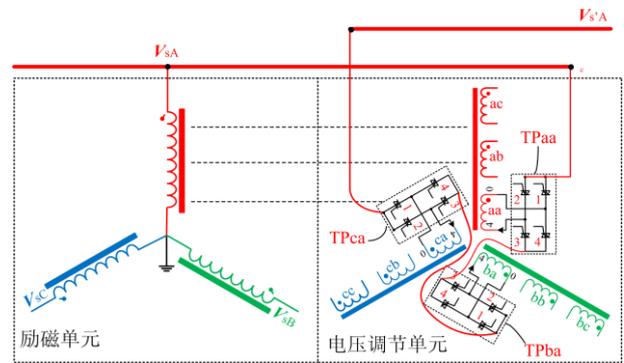


图 1 EST 拓扑结构^[14]

Fig. 1 Topology of EST^[14]

A 相副边抽头为 aa、ab、ac, B 相副边抽头为 ba、bb、bc, C 相副边抽头为 ca、cb、cc。电力电子开关板由 4 对反相并联的晶闸管构成,其两两组件同开同闭,实现对应绕组的同相或反相接入。以 A 相为例,当 EST 补偿的电压相角 $0^\circ < \beta < 120^\circ$, 且运行域为 EST 的扩展域时,通过关闭 TPba 开关组件的 1 号和 3 号电力电子开关,触发导通 4 号和 2 号开关实现 TPba 绕组反相连接,进而实现传统 ST 控制域的扩展^[15]。其中, V_{sA} 、 $V_{s'A}$ 分别为 EST 送端电压、受端电压。电力电子开关组件 TPaa、TPba 和 TPca 分别控制副边 aa、ba、ca 进而组成 A 相的补偿电压,即副边绕组电压 V_{aa} 、 V_{ba} 、 V_{ca} 合成串联补偿电压 $V_{ss'A}$ 。由于 V_{aa} 、 V_{ba} 、 V_{ca} 之间相位互差 120° ,通过控制变压器抽头位置,改变这三个电压向量的组合方式,进而改变串联补偿电压。因此,A 相的送端电压就调整为 $V_{s'A}$,同理,也可实现 B 相、C 相送端目标控制电压 $V_{s'B}$ 、 $V_{s'C}$,进而达到控制线路潮流的目的。

EST 与 ST 相似,其主要有三种运行模式^[16]:电压调节、相角调节和功率调节,图 2(a)、图 2(b)和图 2(c)分别为 EST 工作于这三种运行模式时的向量图。当 EST 工作于电压调节模式时,各相补偿电压的相位与送端电压同相或反相;当 EST 工作于相角调节模式时,其补偿电压的相位超前或滞后于送端电压 90° ;当 EST 工作于功率调节模式时,电压的相位与幅值由潮流控制目标来确定。图 2(d)为 EST 潮流调节流程图,通过线路潮流控制目标(P_{ref} 、 Q_{ref})与运行模式计算出 EST 的串联补偿电压,然后根据分接头算法确定副边各绕组的分接头位置^[23],从而实现潮流控制。

从应用场景的角度,EST 适用于对潮流调节时间要求不高的场合,但是相对于传统 ST,其调节速度更快、响应时间更短^[14];从技术成熟度的角度,目前装置还处于原理性实验探索阶段;从经济性角

度, 其成本高于 ST, 但是其经济性优于目前投入使用的 UPFC。

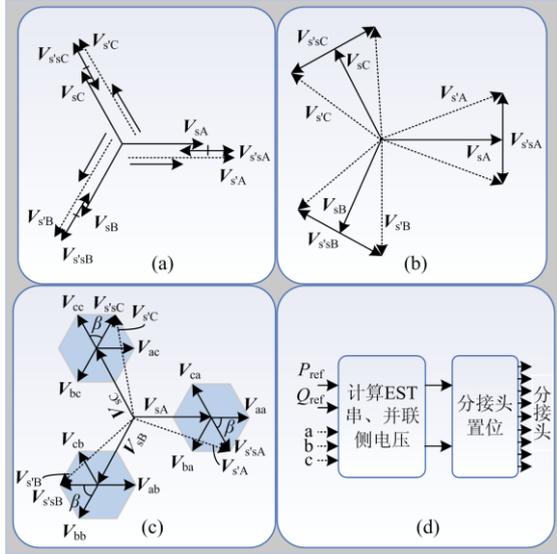


图 2 EST 运行模式^[16]

Fig. 2 Operational modes of EST^[16]

2 适用于统一迭代潮流计算的 EST 模型

2.1 EST 等效模型

根据 EST 的工作原理, 其等效电路如图 3 所示, 串联侧绕组等效为 ST 二次侧绕组的正相补偿电压源、第三相反相绕组的反相补偿电压源与阻抗串联的支路, 并联侧绕组为励磁电压源与阻抗串联构成的支路。

图 3 中, 左侧为 EST 的送端, 右侧为 EST 的受端, I_k 、 I_m 分别为 EST 送端和受端注入电流, V_k 、 V_m 分别为 k 、 m 端节点电压, I_{vR} 为流入 EST 并联侧的电流, V_{ScR} 、 V_{EcR} 分别为 EST 中正相补偿电压源的电压、反相补偿电压源的电压, V_{cR} 、 V_{vR} 分别为 EST 串联侧补偿电压、并联侧的励磁电压, Z_{cR} 、 Z_{vR} 分别表示串联侧、并联侧绕组的阻抗。

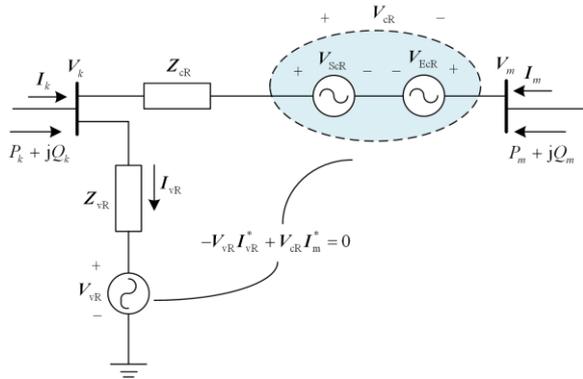


图 3 EST 等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of EST

EST 并联侧发出或吸收的有功和无功功率等于串联侧吸收或发出的有功和无功功率, 所以

$$-V_{vR} I_{vR}^* + V_{cR} I_m^* = 0 \quad (1)$$

式中: $V_{cR} = V_{ScR} - V_{EcR}$; I_{vR}^* 、 I_m^* 分别为电流 I_{vR} 、 I_m 共轭。

为方便表述 EST 潮流模型, 令 $G_{cR} + jB_{cR} = -1/Z_{cR}$, $G_{vR} + jB_{vR} = -1/Z_{vR}$, 由图 3 可知, EST 送端、受端与串、并联侧补偿电压源注入到系统的功率如下:

$$\begin{cases} P_k + jQ_k = V_k (V_k + V_{EcR} - V_{ScR} - V_m)^* (-G_{cR} - jB_{cR})^* + \\ \quad V_k (V_k - V_{vR})^* (-G_{vR} - jB_{vR})^* \\ P_m + jQ_m = V_m (V_m + V_{ScR} - V_{EcR} - V_k)^* (-G_{cR} - jB_{cR})^* \\ P_{vR} + jQ_{vR} = V_{vR} (V_k - V_{vR})^* (-G_{vR} - jB_{vR})^* \\ P_{ScR} + jQ_{ScR} = V_{ScR} (V_m + V_{ScR} - V_{EcR} - V_k)^* (-G_{cR} - jB_{cR})^* \\ P_{EcR} + jQ_{EcR} = -V_{EcR} (V_m + V_{ScR} - V_{EcR} - V_k)^* (-G_{cR} - jB_{cR})^* \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: “*” 表示共轭, 各功率具体值见附录 A, P_k 、 P_m 、 Q_k 、 Q_m 分别为系统注入到 EST 送端 k 和受端 m 的有功、无功功率; P_{vR} 、 Q_{vR} 分别为并联侧励磁电压源产生的有功和无功功率; P_{ScR} 、 Q_{ScR} 分别为串联侧补偿电压源产生的有功和无功功率; P_{EcR} 、 Q_{EcR} 分别为第三相反相绕组补偿电压产生的有功和无功功率。另外, 针对 EST 的三种不同运行模式, 串联侧补偿电压相角 δ_{cR} 与并联侧励磁电压相角 δ_{vR} 存在以下关系。

(a) 当 EST 工作于电压调节模式时:

$$\delta_{vR} = \begin{cases} \delta_{cR} & (\text{反相}) \\ \delta_{cR} - 180^\circ & (\text{同相}) \end{cases} \quad (3)$$

其中, “同相” 表示 EST 并联侧励磁电压的相角与串联侧补偿电压相角相等。“反相” 表示 EST 并联侧励磁电压的相角与串联侧补偿电压相角相差 180° , 后文中“同相”与“反相”含义与此处相同。

(b) 当 EST 工作于相角调节模式时:

$$\delta_{vR} = \begin{cases} \delta_{cR} + 90^\circ & (\text{滞后}) \\ \delta_{cR} - 90^\circ & (\text{超前}) \end{cases} \quad (4)$$

其中, “滞后” 表示 EST 受端电压相角滞后送端电压相角, “超前” 表示 EST 受端电压相角超前送端电压相角, 后文中“超前”与“滞后”含义与此处相同。

(c) 当 EST 工作于功率调节模式时, 其控制的范围为一个正六边形区域, 串联侧补偿电压相角与并联侧励磁电压相角仅由控制目标功率决定。

因此, 当 EST 工作于电压调节模式或相角调节模式时, 在推导的潮流方程中, 根据式(3)或式(4)将串联侧补偿电压相角替换为并联侧励磁电压相

角, 即可实现相应的调节功能。

2.2 EST 的功率不平衡方程

为解算含 EST 的电力系统潮流, 需要将含 EST 的网络与外部网络相结合, 构造含 EST 的节点功率平衡方程与内部功率平衡方程, 进而形成含 EST 的 Jacobian 矩阵以进行迭代计算。式(5)为 EST 送端和受端节点 k 、 m 的有功、无功不平衡方程, 式(6)、式(7)分别为 EST 内部约束条件、潮流控制目标构成的不平衡方程。

$$\begin{cases} \Delta P_k = P'_k - P_k - V_k \sum_{i=1}^{i=n} V_i (G_{ki} \cos \delta_{ki} + B_{ki} \sin \delta_{ki}) \\ \Delta Q_k = Q'_k - Q_k - V_k \sum_{i=1}^{i=n} V_i (G_{ki} \sin \delta_{ki} - B_{ki} \cos \delta_{ki}) \\ \Delta P_m = P'_m - P_m - V_m \sum_{i=1}^{i=n} V_i (G_{mi} \cos \delta_{mi} + B_{mi} \sin \delta_{mi}) \\ \Delta Q_m = Q'_m - Q_m - V_m \sum_{i=1}^{i=n} V_i (G_{mi} \sin \delta_{mi} - B_{mi} \cos \delta_{mi}) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \Delta P_{bb} = P_{ScR} + P_{EcR} + P_{vR} \\ \Delta Q_{bb} = Q_{ScR} + Q_{EcR} + Q_{vR} \end{cases} \quad (6)$$

式(5)中: $P'_k = P_{Gk} - P_{Dk}$, $Q'_k = Q_{Gk} - Q_{Dk}$ 分别为节点 k 的有功、无功注入功率, 其值为节点 k 处发电机出力 P_{Gk} 和 Q_{Gk} 与节点负荷 P_{Dk} 、 Q_{Dk} 的差值; V_i 为节点 i 的电压幅值; $\delta_{ki} = \delta_k - \delta_i$ 为节点 k 和节点 i 的电压相角差。同样地, $\delta_{mi} = \delta_m - \delta_i$ 为相似含义。 G_{ki} 和 B_{ki} 分别为节点 k 与节点 i 之间互导纳的实部和虚部, G_{mi} 和 B_{mi} 含义与此类似。

$$\begin{cases} \Delta P_{mk} = P_{mk} - P_{ref} \\ \Delta Q_{mk} = Q_{mk} - Q_{ref} \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中: P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为 EST 受端控制的目标功率; P_{mk} 、 Q_{mk} 分别为由 m 端流向 k 端的有功、无功功率。

3 含 EST 的电力系统潮流计算流程

基于统一迭代法的含 EST 电力系统潮流计算流程如图 4 所示。其具体步骤:

(1) 设置潮流控制目标 P_{ref} 、 Q_{ref} , 确定 EST 运行模式。

(2) 设置电力网络中各节点与 EST 串、并联侧电压初值。

(3) 根据式(2)计算 EST 送端、受端及串、并联侧电压源产生的有功、无功功率, 同时计算各节点有功、无功功率。

(4) 由式(5)一式(7)计算功率差值; 判断其是否满足允许误差, 若是, 则潮流收敛。否则执行步骤(5)。

(5) 判断迭代次数是否大于设定值, 若是, 潮流不收敛, 说明达不到控制目标, 结束求解。否则执

行步骤(6)。

(6) 计算含有 EST 的 Jacobian 矩阵, 求出 ΔV_i 、 $\Delta \theta_i$ 、 ΔV_{vR} 、 $\Delta \delta_{vR}$ 、 ΔV_{cR} 、 $\Delta \delta_{cR}$ 。

(7) 更新状态变量 V_i 、 θ_i 、 V_{vR} 、 δ_{vR} 、 V_{cR} 、 δ_{cR} , 并校核 V_{vR} 、 V_{cR} 是否越限。若越上限, $V_{vR} = V_{vRmax}$ 、 $V_{cR} = V_{cRmax}$; 若越下限, $V_{vR} = V_{vRmin}$ 、 $V_{cR} = V_{cRmin}$, 返回步骤(3)。

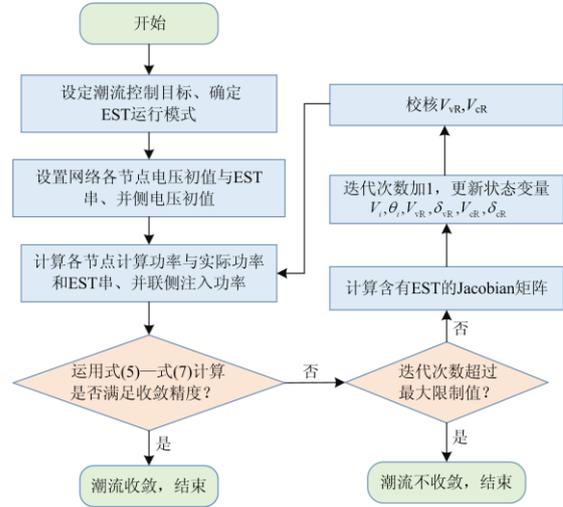


图 4 含 EST 电力系统潮流计算流程图

Fig. 4 Flow diagram of power flow calculation of power system with EST

4 算例分析

为了验证本文所提模型的有效性。算例分析在一个修改的 IEEE6 机 30 节点系统中展开^[24], 具体为: 在线路 3-4 和 12-15 分别安装一个 EST, 如附录图 A1 所示, 借助 Matlab/Simulink 仿真平台建立仿真模型, 利用 load flow 工具包计算系统潮流结果。同时, 依据第 3 节所述方法步骤, 利用 Matlab 软件编写算法程序, 通过比较文中所提模型与软件仿真所得系统各节点电压幅值和相角, 以验证本文所提潮流模型的有效性。

4.1 EST 的功率调节模式

当 EST 工作于功率调节模式时, 在附录图 A1 所示的算例系统中, 忽略绕组的有功损耗, EST 的串、并联侧等效电抗为: $X_{cR1} = X_{cR2} = 0.08 \text{ p.u.}$, $X_{vR1} = X_{vR2} = 0.08 \text{ p.u.}$, 允许误差为 $\varepsilon = 10^{-12}$, 最大迭代次数为 100, 其中 31、32 为接入 EST 后系统引入的附加节点, 即 EST 的受端节点。首先, 在仿真模型中, EST1、EST2 的串联补偿电压设置见表 1, 得到受端的功率为: $P_{ref1} = -0.7093 \text{ p.u.}$, $P_{ref2} = 0.0572 \text{ p.u.}$, $Q_{ref1} = 0.210 \text{ p.u.}$, $Q_{ref2} = 0.0925 \text{ p.u.}$, 其中功率流向系统为负, 流向 EST 为正。然后, 将上

述 EST 受端功率作为本文所提潮流模型的 EST 受端控制目标功率。最后, 根据第 3 节所述步骤得到 EST 的串联补偿电压见表 1, 该算例系统中各节点电压幅值及相角的计算结果与仿真结果如图 5、图 6 所示。

表 1 EST 串联补偿电压

Table 1 Series compensation voltage of EST

参数	EST1		EST2	
	$V_{cr}/p.u.$	$\delta_{cr}/(^{\circ})$	$V_{cr}/p.u.$	$\delta_{cr}/(^{\circ})$
仿真	0.063 2	22.70	0.106 0	13.430
所提模型	0.063 3	22.50	0.110	13.950
% error	0.16	0.88	3.77	3.87

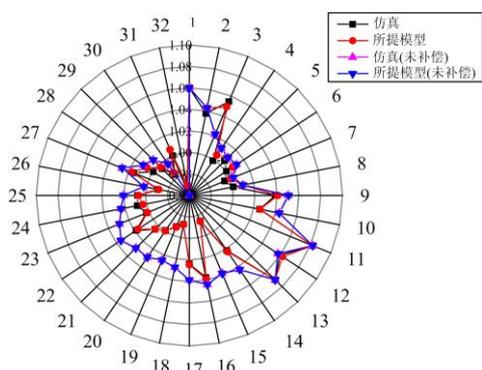


图 5 仿真与所提模型的各节点电压幅值比较

Fig. 5 Comparison of nodal voltage magnitude for simulation and the proposed model

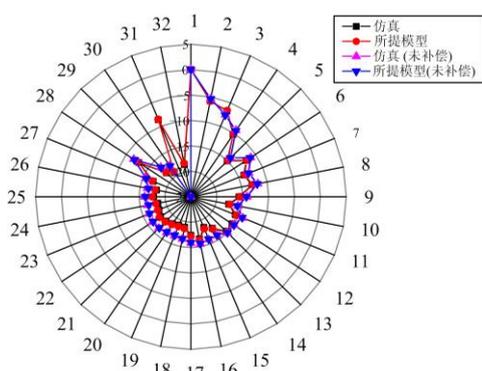


图 6 仿真与所提模型的各节点电压相角比较

Fig. 6 Comparison of nodal voltage angle for simulation and the proposed model

由表 1 可知, EST1、EST2 利用本文所提模型与仿真计算得到串联侧补偿电压的最大误差为 EST2 的补偿相角 3.87%, 误差在合理范围内, 证明了当 EST 工作于功率调节模式时的有效性。

由图 5 和图 6 可知, EST1 所调节线路(3-4)受端节点 4 处的电压幅值和相角与未补偿时分别相差 0.016 4 p.u.、0.920°; 但是相对于 EST2 所调节线路

(12-15)的受端节点 15, 其差异小于节点 15 的 0.056 8 p.u.、2.460°。究其原因, EST2 串联补偿电压幅值大于 EST1 的电压幅值, 说明了 EST 串联补偿的电压越大, 对所调节线路的潮流影响也越大。同时, 补偿时节点 14—27 的电压幅值和相角都与未补偿时差异较大, 其差异最小的节点 16 为 0.010 7 p.u.、0.93°。表明了 EST 的接入对整个系统的潮流分布都存在一定的影响。

4.2 EST 的电压调节模式

当 EST 工作于电压调节模式时, EST1、EST2 的串联补偿电压幅值分别设置为 0.052 0 p.u.、0.115 0 p.u.。计算得到同相与反相时 EST 的送、受端电压幅值与相角见表 2、表 3, 为了便于比较, 其对应的仿真结果也列入表 2、表 3, EST 未参与补偿时其送端和受端节点电压见表 4。

表 2 同相时 EST 送端、受端节点电压与串联补偿电压

Table 2 Voltage of EST at the sending, receiving end and the compensation voltage with in-phase actions of EST

	同相	EST1		EST2	
		$V/p.u.$	$\theta/(^{\circ})$	$V/p.u.$	$\theta/(^{\circ})$
仿真	送端	0.994 3	-6.131	1.048 2	-16.361
	受端	1.032 6	-8.122	1.141 1	-16.982
	串联补偿	0.052	-186.0	0.115 0	-196.0
所提模型	送端	0.993 4	-6.140	1.046 9	-16.164
	受端	1.031 5	-8.128	1.139 7	-17.043
	串联补偿	0.051 0	-186.015	0.116 8	-196.075

表 3 反相时 EST 送端、受端节点电压与串联补偿电压

Table 3 Voltage of EST at the sending, receiving end and the series compensation voltage with out-phase action of EST

	反相	EST1		EST2	
		$V/p.u.$	$\theta/(^{\circ})$	$V/p.u.$	$\theta/(^{\circ})$
仿真	送端	1.047 4	-6.550	1.063 1	-15.910
	受端	1.004 0	-8.790	0.966 5	-16.090
	串联补偿	0.052 0	-6.60	0.115 0	-17.0
所提模型	送端	1.045 8	-6.528	1.064 1	-15.785
	受端	1.007 9	-8.711	0.961 6	-15.950
	串联补偿	0.053 8	-6.580	0.112 8	-16.930

表 4 未补偿时 EST 送端、受端电压

Table 4 Voltage of EST at the sending and receiving end without compensation

	未补偿	EST1		EST2	
		$V/p.u.$	$\theta/(^{\circ})$	$V/p.u.$	$\theta/(^{\circ})$
仿真	送端	1.021 4	-7.59	1.057 4	-15.03
	受端	1.012 6	-9.36	1.038 3	-16.01
所提模型	送端	1.021 7	-7.481	1.057 6	-15.0
	受端	1.012 9	-9.30	1.038 4	-16.0

通过表 2 和表 3 可计算得利用本文所提模型与仿真结果最大误差为反相时 EST1 的串联补偿电压幅值 3.46%，误差在可接受的范围内。同时，由表 2 和表 4 可知，同相补偿时，EST1、EST2 的送端电压幅值低于未补偿时送端节点电压，大小分别为 0.027 1 p.u.、0.009 2 p.u.；从表 3 和表 4 对比可知，反相补偿时 EST1、EST2 送端电压幅值高于未补偿时送端节点电压，大小分别为 0.023 9 p.u.、0.005 7 p.u.。因此，同相补偿时，EST 送端节点电压会降低，反相补偿时，EST 送端节点电压会被抬升，与调压变压器(VRT)的原理分析一致^[25]，这也表明当 EST 工作于电压调节模式时的有效性。

4.3 EST 的相角调节模式

当 EST 工作于相角调节模式时，EST1、EST2 串联补偿电压幅值分别设置为 0.103 0 p.u.、0.115 0 p.u.。超前、滞后时计算得到的 EST 送、受端电压幅值与相角见表 5、表 6，其相应的仿真结果也列入表 5、表 6。

表 5 超前时 EST 送端、受端节点电压与串联补偿电压
Table 5 Voltage of EST at the sending, receiving end and the compensation voltage with leading action of EST

	超前	EST1		EST2	
		V/p.u.	$\theta/(^\circ)$	V/p.u.	$\theta/(^\circ)$
仿真	送端	1.011 4	-8.461	1.057 8	-13.252
	受端	1.020 8	-6.831	1.062 7	-10.531
	串联补偿	0.103 0	-98.90	0.115 0	-105.20
所提模型	送端	1.010 8	-8.335	1.055 5	-13.321
	受端	1.019 5	-6.716	1.062 4	-10.592
	串联补偿	0.1013	-98.375	0.1162	-105.332

表 6 滞后时 EST 送端、受端节点电压与串联补偿电压
Table 6 Voltage of EST at the sending, receiving end and the compensation voltage with lagging action of EST

	滞后	EST1		EST2	
		V/p.u.	$\theta/(^\circ)$	V/p.u.	$\theta/(^\circ)$
仿真	送端	1.022 9	-4.261	1.057 1	-16.411
	受端	1.025 8	-11.520	1.062 0	-22.110
	串联补偿	0.103 0	86.10	0.115 0	74.30
所提模型	送端	1.024 4	-4.150	1.055 6	-16.813
	受端	1.021 6	-11.401	1.061 5	-22.771
	串联补偿	0.102 1	85.924	0.116 5	73.891

由表 5、表 6 可知，利用本文所提模型与仿真得到的最大误差为超前时 EST2 受端节点电压幅值 3.74%，其误差在合理的范围内。同时，由表 4 和表 5 可知，超前补偿时，EST1、EST2 受端节点分别超前于未补偿时的相角 2.529°、4.499°；滞后补

偿时，由表 4 和表 6 可知，EST1、EST2 受端节点分别滞后于未补偿时 2.05°、6.11°。因此，超前补偿时，其 EST1、EST2 受端节点均超前于未补偿时的相角，而滞后补偿时，EST1、EST2 受端节点均滞后于未补偿时的相角，说明了 EST 工作于相角调节模式时的有效性。

5 结论

为了发展基于扩展型“Sen”变压器的潮流计算理论与方法，本文建立了一种适用于统一迭代潮流计算的扩展型“Sen”变压器稳态潮流模型。在一个含扩展型“Sen”变压器修改的 IEEE6 机 30 节点系统中，通过比较在电压调节、相角调节和功率调节模式下文中所提模型与仿真得出的系统各节点电压幅值和相角，总体误差在 3.87% 以内，其误差在合理的范围内，验证了所提模型的有效性。

附录 A

$$P_k = V_k^2 G_{kk} + V_k V_m [G_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km} \sin(\theta_k - \theta_m)] + V_k V_{ScR} [G_{km} \cos(\theta_k - \delta_{ScR}) + B_{km} \sin(\theta_k - \delta_{ScR})] - V_k V_{EcR} [G_{km} \cos(\theta_k - \delta_{EcR}) + B_{km} \sin(\theta_k - \delta_{EcR})] + V_k V_{vR} [G_{vR} \cos(\theta_k - \delta_{vR}) + B_{vR} \sin(\theta_k - \delta_{vR})] \quad (A-1)$$

$$Q_k = -V_k^2 B_{kk} + V_k V_m [G_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) - B_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)] + V_k V_{ScR} [G_{km} \sin(\theta_k - \delta_{ScR}) - B_{km} \cos(\theta_k - \delta_{ScR})] - V_k V_{EcR} [G_{km} \sin(\theta_k - \delta_{EcR}) - B_{km} \cos(\theta_k - \delta_{EcR})] + V_k V_{vR} [G_{vR} \sin(\theta_k - \delta_{vR}) - B_{vR} \cos(\theta_k - \delta_{vR})] \quad (A-2)$$

$$P_m = V_m^2 G_{mm} + V_m V_k [G_{mk} \cos(\theta_m - \theta_k) + B_{mk} \sin(\theta_m - \theta_k)] + V_m V_{ScR} [G_{mm} \cos(\theta_m - \delta_{ScR}) + B_{mm} \sin(\theta_m - \delta_{ScR})] - V_m V_{EcR} [G_{mm} \cos(\theta_m - \delta_{EcR}) + B_{mm} \sin(\theta_m - \delta_{EcR})] \quad (A-3)$$

$$Q_m = -V_m^2 B_{mm} + V_m V_k [G_{mk} \sin(\theta_m - \theta_k) - B_{mk} \cos(\theta_m - \theta_k)] + V_m V_{ScR} [G_{mm} \sin(\theta_m - \delta_{ScR}) - B_{mm} \cos(\theta_m - \delta_{ScR})] - V_m V_{EcR} [G_{mm} \sin(\theta_m - \delta_{EcR}) - B_{mm} \cos(\theta_m - \delta_{EcR})] \quad (A-4)$$

$$P_{ScR} = V_{ScR}^2 G_{mm} + V_{ScR} V_k [G_{mk} \cos(\delta_{ScR} - \theta_k) + B_{mk} \sin(\delta_{ScR} - \theta_k)] + V_{ScR} V_m [G_{mm} \cos(\delta_{ScR} - \theta_m) + B_{mm} \sin(\delta_{ScR} - \theta_m)] - V_{ScR} V_{EcR} [G_{mm} \cos(\delta_{ScR} - \delta_{EcR}) + B_{mm} \sin(\delta_{ScR} - \delta_{EcR})] \quad (A-5)$$

$$Q_{ScR} = -V_{ScR}^2 B_{mm} + V_{ScR} V_k [G_{mk} \sin(\delta_{ScR} - \theta_k) - B_{mk} \cos(\delta_{ScR} - \theta_k)] + V_{ScR} V_m [G_{mm} \sin(\delta_{ScR} - \theta_m) - B_{mm} \cos(\delta_{ScR} - \theta_m)] - V_{ScR} V_{EcR} [G_{mm} \sin(\delta_{ScR} - \delta_{EcR}) - B_{mm} \cos(\delta_{ScR} - \delta_{EcR})] \quad (A-6)$$

$$P_{\text{Ecr}} = V_{\text{Ecr}}^2 G_{mm} - V_{\text{Ecr}} V_m [G_{mm} \cos(\delta_{\text{Ecr}} - \theta_m) + B_{mm} \sin(\delta_{\text{Ecr}} - \theta_m)] - V_{\text{Ecr}} V_k [G_{mk} \cos(\delta_{\text{Ecr}} - \theta_k) + B_{mk} \sin(\delta_{\text{Ecr}} - \theta_k)] - V_{\text{Ecr}} V_{\text{ScR}} [G_{mm} \cos(\delta_{\text{Ecr}} - \delta_{\text{ScR}}) + B_{mm} \sin(\delta_{\text{Ecr}} - \delta_{\text{ScR}})] \quad (\text{A-7})$$

$$Q_{\text{Ecr}} = -V_{\text{Ecr}}^2 B_{mm} - V_{\text{Ecr}} V_m [G_{mm} \sin(\delta_{\text{Ecr}} - \theta_m) - B_{mm} \cos(\delta_{\text{Ecr}} - \theta_m)] - V_{\text{Ecr}} V_k [G_{mk} \sin(\delta_{\text{Ecr}} - \theta_k) - B_{mk} \cos(\delta_{\text{Ecr}} - \theta_k)] - V_{\text{Ecr}} V_{\text{ScR}} [G_{mm} \sin(\delta_{\text{Ecr}} - \delta_{\text{ScR}}) - B_{mm} \cos(\delta_{\text{Ecr}} - \delta_{\text{ScR}})] \quad (\text{A-8})$$

$$P_{\text{vR}} = -V_{\text{vR}}^2 G_{\text{vR}} + V_{\text{vR}} V_k [G_{\text{vR}} \cos(\delta_{\text{vR}} - \theta_k) + B_{\text{vR}} \sin(\delta_{\text{vR}} - \theta_k)] \quad (\text{A-9})$$

$$Q_{\text{vR}} = V_{\text{vR}}^2 B_{\text{vR}} + V_{\text{vR}} V_k [G_{\text{vR}} \sin(\delta_{\text{vR}} - \theta_k) - B_{\text{vR}} \cos(\delta_{\text{vR}} - \theta_k)] \quad (\text{A-10})$$

式中, δ_{Ecr} 、 δ_{ScR} 分别为 EST 中正相补偿电压源的电压相角、反相补偿电压的相角。

$$Y_{kk} = G_{kk} + jB_{kk} = Z_{\text{cR}}^{-1} + Z_{\text{vR}}^{-1} \quad (\text{A-11})$$

$$Y_{mm} = G_{mm} + jB_{mm} = Z_{\text{cR}}^{-1} \quad (\text{A-12})$$

$$Y_{km} = Y_{km} = G_{km} + jB_{km} = -Z_{\text{cR}}^{-1} \quad (\text{A-13})$$

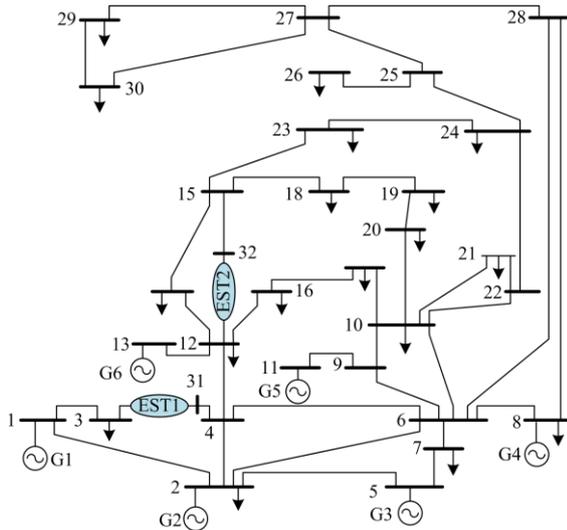


图 A1 含 EST 的修改 IEEE30 节点系统

Fig. A1 The modified IEEE30 bus system with EST

参考文献

[1] 艾芊, 杨曦, 贺兴. 提高电网输电能力技术概述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 34-40.
AI Qian, YANG Xi, HE Xing. Research on technologies for improving power grid transmission capacity[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 34-40.

[2] LI Gengyin, LI Guodong, ZHOU Ming. Comprehensive evaluation model of wind power accommodation ability based on macroscopic and microscopic indicators[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(3): 215-226. DOI: 10.1186/s41601-019-0132-6.

[3] MA Zhaoxing, CHEN Hao, CHAI Yanli. Analysis of

voltage stability uncertainty using stochastic response surface method related to wind farm correlation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(3): 211-219. DOI: 10.1186/s41601-017-0051-3.

[4] 韩松, 王兴龙. 弱一致性风速分布山区风电场机电暂态建模及适用性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 1-7.
HAN Song, WANG Xinglong. Modeling of DFIG based wind farm considering temporal and spatial non-uniformity of wind speed in mountainous region and its applicability analysis[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 1-7.

[5] 路畅, 郭力, 柴园园, 等. 含高渗透分布式光伏的增量配电网日前优化调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 90-98.
LU Chang, GUO Li, CHAI Yuanyuan, et al. Day-ahead optimal scheduling method for incremental distribution network with high penetration of distributed photovoltaic[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 90-98.

[6] 刘岩, 吴以岷, 徐荣敏, 等. 含智能负荷和分布式能源接入的配电网调度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 116-123.
LIU Yan, WU Yimin, XU Rongmin, et al. Research on distribution network scheduling with smart load and distributed energy access[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 116-123.

[7] 刘德顺, 董海鹰, 汪宁渤, 等. 基于多时空尺度协调的多源互补发电场群优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 73-83.
LIU Deshun, DONG Haiying, WANG Ningbo, et al. Optimization scheduling for multi-source complementary power plants group based on multiple temporal and spatial scales coordination[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 73-83.

[8] 谭振龙, 张春朋, 姜齐荣, 等. 旋转潮流控制器与统一潮流控制器和 Sen Transformer 的对比[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 868-874.
TAN Zhenlong, ZHANG Chunpeng, JIANG Qirong, et al. Comparative research on rotary power flow controller, unified power flow controller and Sen Transformer[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 868-874.

[9] SEN K K, SEN M L. Introducing the family of “Sen” transformers: a set of power flow controlling transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(1): 149-157.

[10] SEN K K, SEN M L. Comparison of the “Sen” transformer with the unified power flow controller[J].

- IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(4): 1523-1533.
- [11] MOHAMED G, JASNI S E, RADZI J, et al. Power transistor-assisted Sen Transformer: A novel approach to power flow control[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 133: 228-240.
- [12] 陈柏超, 刘雷, 余梦泽, 等. 电磁混合式潮流控制器本体优化及控制[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1086-1094.
CHEN Baichao, LIU Lei, YU Mengze, et al. Ontology optimization and control strategy of electromagnetic hybrid power flow controller[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1086-1094.
- [13] 陈柏超, 费雯丽, 田翠华, 等. 新型混合式统一潮流控制器及其调节特性分析[J]. 高电压技术, 2017, 43(10): 3256-3264.
CHEN Baichao, FEI Wenli, TIAN Cuihua, et al. Novel hybrid unified power flow controller and regulation performance analysis[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(10): 3256-3264.
- [14] 韩松, 荣娜, 许逵. 变压器副边绕组反相的少级数特征潮流控制装置与方法: 中国, 201510330860.6[P]. 2016-01-20.
HAN Song, RONG Na, XU Kui. The power flow control device and method for small numbers of inverting secondary windings of transformer: China, 201510330860.6[P]. 2016-01-20.
- [15] 韩松, 荣娜. 特种变压器型潮流控制装置的多级数分接头控制方法: 中国, 201510431561.1[P]. 2016-01-20.
HAN Song, RONG Na. Multi-step taps control method of special transformer type power flow control device: China, 201510431561.1[P]. 2016-01-20.
- [16] ASGHARI B, FARUQUE M O, DINAHAHI V. Detailed real-time transient model of the "Sen" transformer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(3): 1513-1521.
- [17] LIU J, DINAHAHI V. Nonlinear magnetic equivalent circuit-based real-time Sen transformer electromagnetic transient model on FPGA for HIL emulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(6): 2483-2493.
- [18] KAMEL S, JURADO F, LOPES J A P. Comparison of various UPFC models for power flow control[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 121: 243-251.
- [19] 杨健, 宋鹏程, 徐政. 适用于新型 UPFC 拓扑的电力系统潮流计算方法[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 888-894.
YANG Jian, SONG Pengcheng, XU Zheng. A load flow calculation method for power systems with novel UPFC topology[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 888-894.
- [20] 李生虎, 汪婷, 吴东, 等. 基于初值估算和潮流可控范围的 UPFC 潮流收敛特性研究[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(12): 67-72.
LI Shenghu, WANG Ting, WU Dong, et al. Power flow convergence characteristic of UPFC based on initial value evaluation and controllable range of power flow[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 67-72.
- [21] NABAVI-NIAKI A, LRAVANI M R. Steady-state and dynamic models of unified power flow controller (UPFC) for power system studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(4): 1937-1943.
- [22] GASIM MOHAMED S E, JASNI J, RADZI M A M, et al. Implementation of the power transistor-assisted Sen transformer in steady-state load flow analysis[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(18): 4182-4193.
- [23] FARUQUE M O, DINAHAHI V. A tap-changing algorithm for the implementation of "Sen" transformer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1750-1757.
- [24] EBEED M, KAMEL S, YU J, et al. Development of UPFC operating constraints enforcement approach for power flow control[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(20): 4579-4591.
- [25] SEN K K, SEN M L. Introduction to FACTS controllers: theory, modeling, and applications[M]. New York: Wiley-IEEE Press, 2009.

收稿日期: 2019-12-12; 修回日期: 2020-04-02

作者简介:

冯金铃(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定与控制、柔性交流输电技术; E-mail: 2399268975@qq.com

韩松(1978—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为交直流电力系统动态分析、新型电力电子装备以及配电网规划; E-mail: ee.hans@gmail.com

潘宇航(1994—), 男, 硕士研究生, 主要方向为电力系统稳定与控制、柔性交流输电技术以及多物理场仿真。E-mail: yhpan424@163.com

(编辑 葛艳娜)