

广域环境下微缩电网关键节点电压调控规律研究

为了简化电网的分析和调控,根据节点电压矢量与电流矢量之间的关系,推导出节点电压矢量与功率之间的解析关系。在广域量测环境下,提出微缩电网的定义及其节点电压矢量与功率间的解析关系;在不计输电线路潮流越限的情况下,进一步得到整个微缩电网微缩至关键节点的解析关系,从而实现了电网的简化分析和调控,对提高系统分析和控制的效率具有重要意义。仿真结果表明了所提方法的有效性。

樊唯钦 李勇钢 卢芳/日照供电公司



樊唯钦/高级工程师

随着电网量测手段的日益丰富,电网广域化系统(WAMS)日渐成型,电力系统运行的各个状态全景可观测,高维度的数据以高增长率的速度传送至系统运行、调度和控制人员的面前,如何挖掘海量数据中潜在的规律,成为新形势下面临的紧急任务。

对于节点电压控制问题,如何从全景过程化的量测数据中挖掘节点电压与其调控量之间的解析关系,发现节点电压一致性变化的规律,从而掌控关键节点的调控方式,对于简化节点电压的预测、调控具有重要意义。

本文以传统节点电压方程为基础,推导节点电压与功率之间的解析关系;在此基础上,提出源和微缩电网的定义及其简化的关键节点的调控模型;最后给出该简化调控模型的求解方法。

关键词/Keywords

微缩电网·
关键节点·
调控规律·
简化·

节点电压向量与电流向量的关系

在广域量测环境下(忽略量测环节所引起的误差),各母线电压、电流注入矢量均已知,假设电网结构不变,以大地为参考节点,那么对于含有 n 个节点

的电网,可以按照传统电网分析理论将节点电压和电流矢量间的关系表示为如下的线性形式

$$\begin{cases} z_{11}I_1 + z_{12}I_2 + \cdots + z_{1n}I_n = V_1 \\ z_{21}I_1 + z_{22}I_2 + \cdots + z_{2n}I_n = V_2 \\ \vdots \\ z_{n1}I_1 + z_{n2}I_2 + \cdots + z_{nn}I_n = V_n \end{cases} \quad (1)$$

式中, $I_1, I_2, \dots, I_n$ 为给定的节点注入电流构成的列矢量; $V_1, V_2, \dots, V_n$ 为给定的节点电压构成的列矢量; $z_{ij}(i, j = 1, 2, \dots, n)$ 为传统电网分析理论中的节点阻抗参数。

节点电压矢量与功率之间的关系

根据经典经济调度B系数法及相关参考文献可知,节点 i 的注入电流矢量 I_i 可以表示为

$$\begin{aligned} I_i &= I_{ix} + jI_{iy} = \frac{\hat{S}_i}{\hat{V}_i} = \frac{P_i - jQ_i}{V_{ix} - jV_{iy}} \\ &= \frac{V_{ix}P_i + V_{iy}Q_i}{V_i^2} + j\frac{V_{iy}P_i - V_{ix}Q_i}{V_i^2} \quad (2) \\ &= (a_{ix}P_i + b_{iy}Q_i) + j(b_{ix}P_i - a_{iy}Q_i) \end{aligned}$$

式中, I_{ix}, I_{iy} 分别为节点 i 注入电流矢量的实部和虚部; $\hat{S}_i$ 为节点 i 复功率的共轭; $\hat{V}_i$ 为节点 i 电压矢量的共轭; V_{ix}, V_{iy} 分别为节点 i 电压矢量的实部和虚部; V_i 为节点 i 的电压幅值;系数 $a_{ix} = \frac{V_{ix}}{V_i^2}$, $b_{iy} = \frac{V_{iy}}{V_i^2}$ 。

由于式(2)中系数 a_{ix}, b_{iy} 均为实数,而式(1)中的系数由传统理论可知均为复数,因此将式(1)中的系数表示为: $z_{ik} = r_{ik} + jx_{ik}(i, k = 1, 2, \dots, n)$ 。将式(2)代入式(1)中,整理得

$$\begin{cases} c_{11}\hat{S}_1 + c_{12}\hat{S}_2 + \cdots + c_{1n}\hat{S}_n = V_1 \\ c_{21}\hat{S}_1 + c_{22}\hat{S}_2 + \cdots + c_{2n}\hat{S}_n = V_2 \\ \vdots \\ c_{n1}\hat{S}_1 + c_{n2}\hat{S}_2 + \cdots + c_{nn}\hat{S}_n = V_n \end{cases} \quad (3)$$

式中, c_{ik} 为复系数, $c_{ik} = (r_{ik}a_{kx} - x_{ik}b_{ky}) + j(r_{ik}b_{ky} + x_{ik}a_{kx})$; S_i 为节点 i 注入复功率; $\hat{S}_i$ 为其共轭。

式(3)表达了节点注入功率与电压矢量之间的控制和被控制之间的关系,是由传统节点电压方程推导得到的,也是传统节点电压方程的推广和引申。

广域环境下微缩电网关键节点电压调控规律模型

1. 概念定义

源特性规律模型是广域环境下,源注入某一电压等级电网的功率与其相应决策间关系的变化规律模型。

将源特性规律模型融入相应电压等级下的电网就构成微缩电网。

2. 源特性规律模型

在电网拓扑中,源通过变压器与微缩电网连接,在过程化的决策条件下,通过对源复功率出力及其变压器支路上复功率损耗的学习,可得到注入微缩电网功率的变化规律。融入了源特性规律的微缩电网就是对原网络的浓缩。

源是微缩电网间的接入点和协调点,根据大规模电力网络节点分裂原理,选择协调点作为网络的分裂点,将分裂点接地或者作为一给定量,那么所形成的子网就是一个独立的网,该子网内的复功率损耗仍满足损失系数法理论,对于单条支路损耗的计算也同样适用,具体表示为

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^g d_{1j} \left[\sum_{i \in G} (\hat{S}_i - \hat{S}_L^{i \rightarrow j}) + \sum_{k \in D} (\hat{S}_k + \hat{S}_L^{k \rightarrow j}) \right] + d_{1(g+1)} \hat{S}_{g+1} \cdots + d_{1p} \hat{S}_p = V_1 \\ \sum_{j=1}^g d_{2j} \left[\sum_{i \in G} (\hat{S}_i - \hat{S}_L^{i \rightarrow j}) + \sum_{k \in D} (\hat{S}_k + \hat{S}_L^{k \rightarrow j}) \right] + d_{2(g+1)} \hat{S}_{g+1} \cdots + d_{2p} \hat{S}_p = V_2 \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^g d_{pj} \left[\sum_{i \in G} (\hat{S}_i - \hat{S}_L^{i \rightarrow j}) + \sum_{k \in D} (\hat{S}_k + \hat{S}_L^{k \rightarrow j}) \right] + d_{p(g+1)} \hat{S}_{g+1} \cdots + d_{pp} \hat{S}_p = V_p \end{cases} \quad (7)$$

$$S_L = \hat{S}_G B_{G1} S_G + \hat{S}_G B_{G2} + \hat{S}_G B_{G3} + B_0 \quad (4)$$

式中, S_L 为复功率损耗; S_G 为子网内电源(或等效电源)复功率的列矢量; $\hat{S}_G$ 为其共轭转置; B_{G1} 为二次项复系数; B_{G2} 、 B_{G3} 为一次项复系数; B_0 为常数项。

设单个微缩电网内有 $p(p < n)$ 个节点,其中 g 个节点(其节点编号设为 $1, 2, \dots, g$)与 q 个源通过变压器支路连接,则该 g 个节点的源特性模型为

$$\begin{aligned} S_j &= \sum_{i \in G} (S_i - S_L^{i \rightarrow j}) + \sum_{k \in D} (S_k + S_L^{k \rightarrow j}) \\ S_L^{i \rightarrow j} &= \hat{S}_G^T B_1^{i \rightarrow j} S_G + \hat{S}_G^T B_2^{i \rightarrow j} + S_G B_3^{i \rightarrow j} + B_4^{i \rightarrow j} \\ S_L^{k \rightarrow j} &= \hat{S}_G^T B_1^{k \rightarrow j} S_G + \hat{S}_G^T B_2^{k \rightarrow j} + S_G B_3^{k \rightarrow j} + B_4^{k \rightarrow j} \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $S_L^{i \rightarrow j}$ 为节点 i 与 j 之间的复功率损耗, $i \in G$ 表示节点 i 为电源节点; $S_L^{k \rightarrow j}$ 为节点 k 与 j 之间的复功率损耗, $k \in D$ 表示节点 k 为负荷节点; 电源节点 G 总数与负荷节点 D 总数为 q ; $B_1^{i \rightarrow j}$ 、 $B_2^{i \rightarrow j}$ 、 $B_3^{i \rightarrow j}$ 和 $B_4^{i \rightarrow j}$ 及 $B_1^{k \rightarrow j}$ 、 $B_2^{k \rightarrow j}$ 、 $B_3^{k \rightarrow j}$ 和 $B_4^{k \rightarrow j}$ 为待回归的复系数。

在过程化的量测数据下,通过对式(5)损耗系数的最小二乘估计,可以得到相应的源特性规律表达式。

3. 微缩电网节点电压调控模型

如前所述,单个微缩电网就是一个独立的电网,按传统电网分析理论,其节点电压矢量仍满足式(3)的形式,具体如下

$$\begin{cases} d_{11}\hat{S}'_1 + d_{12}\hat{S}'_2 + \cdots + d_{1g}\hat{S}'_g + d_{1(g+1)}\hat{S}'_{g+1} + \cdots + d_{1p}\hat{S}'_p = V_1 \\ d_{21}\hat{S}'_1 + d_{22}\hat{S}'_2 + \cdots + d_{2g}\hat{S}'_g + d_{2(g+1)}\hat{S}'_{g+1} + \cdots + d_{2p}\hat{S}'_p = V_2 \\ \vdots \\ d_{p1}\hat{S}'_1 + d_{p2}\hat{S}'_2 + \cdots + d_{pg}\hat{S}'_g + d_{p(g+1)}\hat{S}'_{g+1} + \cdots + d_{pp}\hat{S}'_p = V_p \end{cases} \quad (6)$$

式中, $S'_i (i=1, 2, \dots, g)$ 为源特性模型的复功率; $\hat{S}'_i$ 为其共轭; $d_{ij} (i, j=1, 2, \dots, p)$ 为待回归的复系数。

将源特性式(5)代入式(6)中,得

由于式 (7) 中的损耗展开后具有如式 (4) 所表达的相同形式, 合并后式 (7) 可以进一步展开为

$$\begin{cases} \hat{S}_G^T B_{11} S_G + \hat{S}_G^T B_{12} + S_G^T B_{13} + B_{14} + \sum_{j=1}^g d_{1j} (\sum_{k \in D} \hat{S}_k) + \sum_{i=g+1}^g d_{1i} \hat{S}_i = V_1 \\ \hat{S}_G^T B_{21} S_G + \hat{S}_G^T B_{22} + S_G^T B_{23} + B_{24} + \sum_{j=1}^g d_{2j} (\sum_{k \in D} \hat{S}_k) + \sum_{i=g+1}^g d_{2i} \hat{S}_i = V_2 \\ \vdots \\ \hat{S}_G^T B_{p1} S_G + \hat{S}_G^T B_{p2} + S_G^T B_{p3} + B_{p4} + \sum_{j=1}^g d_{pj} (\sum_{k \in D} \hat{S}_k) + \sum_{i=g+1}^g d_{pi} \hat{S}_i = V_p \end{cases} \quad (8)$$

式中, $B_{ij}(i=1,2,\dots,p; j=1,2,3,4)$ 为损耗的系数。

在广域量测环境下, 节点电压、注入功率都可作为已知的量, 因此, 式 (8) 中的系数可以通过非线性最小二乘法估计得到。

4. 微缩电网关键节点电压调控模型

在 5 min 的在线调度时段内, 系统仅发生小扰动的情况下, 关键节点电压具有单调性, 设为节点 k^* , 那么在实施调控决策时, 只要保证该节点电压的安全水平即可, 具体如下

$$\begin{aligned} & \hat{S}_G^T B_{k^*1} S_G + \hat{S}_G^T B_{k^*2} + S_G^T B_{k^*3} + B_{k^*4} + \\ & \sum_{j=1}^g d_{k^*j} (\sum_{k \in D} \hat{S}_k) + \sum_{i=g+1}^g d_{k^*i} \hat{S}_i = V_{k^*} \end{aligned} \quad (9)$$

此外, 若不计输电线路的潮流越限, 那么整个微缩电网就可以微缩至关键节点, 节点电压可以表示为

$$\beta \hat{S}_{k^*}' = V_{k^*} \quad (10)$$

式中, S_{k^*}' 为关键节点的源特性复功率; $\hat{S}_{k^*}'$ 为其共轭; β 为待回归的复系数。

将微缩后关键节点源特性融入式 (10), 得

$$\beta [\sum_{i \in G} (\hat{S}_i - \hat{S}_L^{i \rightarrow j}) + \sum_{k \in D} (\hat{S}_k + \hat{S}_L^{k \rightarrow j}) - \hat{S}_L] = V_{k^*} \quad (11)$$

式中, S_L 为微缩电网的复功率总损耗; $\hat{S}_L$ 为其共轭。

由此整个微缩电网就完全实现了微缩, 通过非线性最小二乘法估计式 (11) 的系数 β , 就得到微缩电网的调控规律。

关键节点电压调控模型的非线性最小二乘法求解

给定式 (9) 中 N 组 $p-g+q$ 个节点注入复功率及节点电压矢量 V_{k^*} 的量测数据, 根据非线性回归

分析的最小二乘估计求解方法, 式 (9) 可表示为

$$\begin{cases} \min Q = \sum_{t=1}^N \varepsilon_t^2 \\ \text{s.t. } V_t + \varepsilon_t = f(S_t, \tilde{\beta}) \quad t=1,2,\dots,N \end{cases} \quad (12)$$

式中, $\tilde{\beta} = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m)$ 为待回归的系数; $V_t(t=1, 2, \dots, N)$ 为 V_{k^*} 的量测数据; $S_t(t=1, 2, \dots, N)$ 为式 (9) 中 $p-g+q$ 个节点复功率矢量的量测数据; f 为注入功率与节点电压之间的函数关系。

使用高斯-牛顿迭代求解参数 $\tilde{\beta}$ 。设 $\tilde{\beta}$ 的第 k 次解为 $\tilde{\beta}^{(k)}$, 第 $k+1$ 次迭代解为 $\tilde{\beta}^{(k+1)}$, 则

$$\Delta \tilde{\beta}^{(k+1)} = \tilde{\beta}^{(k+1)} - \tilde{\beta}^{(k)} \quad (13)$$

将式 (12) 在 $\tilde{\beta}^{(k)}$ 处展开, 取一次项, 得到线性化的误差方程为

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1^{(k+1)} \\ \varepsilon_2^{(k+1)} \\ \vdots \\ \varepsilon_N^{(k+1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1m} \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{N1} & f_{N2} & \cdots & f_{Nm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \beta_1^{(k+1)} \\ \Delta \beta_2^{(k+1)} \\ \vdots \\ \Delta \beta_m^{(k+1)} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} V_1 - f(S_1, \tilde{\beta}^{(k)}) \\ V_2 - f(S_2, \tilde{\beta}^{(k)}) \\ \vdots \\ V_N - f(S_N, \tilde{\beta}^{(k)}) \end{pmatrix} \quad (14)$$

其中, $f_{ij} = \frac{\partial f(S_i, \tilde{\beta}^{(k)})}{\partial \beta_j^{(k)}}$ 。

$$\text{式中, } E^{(k+1)} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1^{(k+1)} \\ \varepsilon_2^{(k+1)} \\ \vdots \\ \varepsilon_N^{(k+1)} \end{pmatrix}; \quad F_{(k)} = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1m} \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{N1} & f_{N2} & \cdots & f_{Nm} \end{pmatrix};$$

$$\Delta \tilde{\beta}^{(k+1)} = \begin{pmatrix} \Delta \beta_1^{(k+1)} \\ \Delta \beta_2^{(k+1)} \\ \vdots \\ \Delta \beta_m^{(k+1)} \end{pmatrix}; \quad L^{(k)} = \begin{pmatrix} V_1 - f(S_1, \tilde{\beta}^{(k)}) \\ V_2 - f(S_2, \tilde{\beta}^{(k)}) \\ \vdots \\ V_N - f(S_N, \tilde{\beta}^{(k)}) \end{pmatrix}。$$

将式 (14) 表示为矩阵形式为

$$E^{(k+1)} = F_{(k)} \Delta \tilde{\beta}^{(k+1)} - L^{(k)} \quad (15)$$

式 (15) 为线性化的误差方程, 根据最小二乘原理, 可得

$$\Delta \tilde{\beta}^{(k+1)} = (F_{(k)}^T F_{(k)})^{-1} F_{(k)}^T L^{(k)} \quad (16)$$

随着迭代次数的增加, $\Delta \tilde{\beta}^{(k+1)}$ 将趋于 0, 通常根据准确度的需要设置一个限值, 即

$$|\Delta \tilde{\beta}_i^{(k+1)}| \leq \xi \quad i=1, 2, \dots, m$$

满足给定的终止条件时, 迭代终止。

根据上述方法, 同理可计算出式 (8)、式 (11) 的系数。

算例分析

采用 IEEE 10 母线系统来验证本文所提的微电网关键节点电压调控模型, 如图 1 所示。使用 VS2008 及 Matlabr 2011 软件对上述算法进行程序编写。

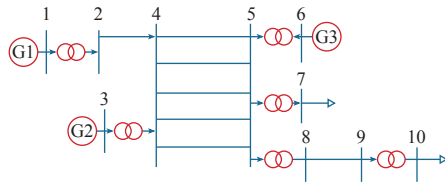


图1 IEEE 10母线系统

1. 源特性模型

由图1可以看出, 系统可以分为两个子网, 即由节点1~节点8及其之间线路构成的子网1和由节点8~节点10及其之间连接线路构成的子网2, 节点8是两个子网之间的协调变量。

根据网络的节点分裂原理, 将节点8接地或者作为一个给定的量, 那么所形成的子网络就是一个独立的网, 本文以子网1为研究对象。根据前述定义, 子网1内节点2、4、5及其之间的输电线路处于同一电压等级下, 1、3、6、7和8为源节点, 因此可分别建立源注入该同一电压等级下电网的功率规律模型。

首先通过使用模型 (4), 建立各支路的损耗模型, 即

$$\begin{aligned} S_L^{1 \rightarrow 2} &= \hat{S}_G^T B_1^{1 \rightarrow 2} S_G + \hat{S}_G^T B_2^{1 \rightarrow 2} + S_G^T B_3^{1 \rightarrow 2} + B_4^{1 \rightarrow 2} \\ S_L^{3 \rightarrow 4} &= \hat{S}_G^T B_1^{3 \rightarrow 4} S_G + \hat{S}_G^T B_2^{3 \rightarrow 4} + S_G^T B_3^{3 \rightarrow 4} + B_4^{3 \rightarrow 4} \end{aligned}$$

$$S_L^{6 \rightarrow 5} = \hat{S}_G^T B_1^{6 \rightarrow 5} S_G + \hat{S}_G^T B_2^{6 \rightarrow 5} + S_G^T B_3^{6 \rightarrow 5} + B_4^{6 \rightarrow 5} \quad (17)$$

$$S_L^{7 \rightarrow 5} = \hat{S}_G^T B_1^{7 \rightarrow 5} S_G + \hat{S}_G^T B_2^{7 \rightarrow 5} + S_G^T B_3^{7 \rightarrow 5} + B_4^{7 \rightarrow 5}$$

$$S_L^{8 \rightarrow 5} = \hat{S}_G^T B_1^{8 \rightarrow 5} S_G + \hat{S}_G^T B_2^{8 \rightarrow 5} + S_G^T B_3^{8 \rightarrow 5} + B_4^{8 \rightarrow 5}$$

其中, $S_G = [S_1 \ S_3 \ S_6]^T$; $\hat{S}_G^T$ 为其共轭转置。

采集电网短期内的 100 组潮流断面下的 S_1 、 S_3 、 S_6 、 $S_L^{1 \rightarrow 2}$ 、 $S_L^{3 \rightarrow 4}$ 、 $S_L^{6 \rightarrow 5}$ 、 $S_L^{7 \rightarrow 5}$ 和 $S_L^{8 \rightarrow 5}$ 作为量测数据样本, 其中 90 组样本用于估计上述系数, 采用另外 10 组样本对估计系数的预测结果进行测试, 结果如图 2 所示。

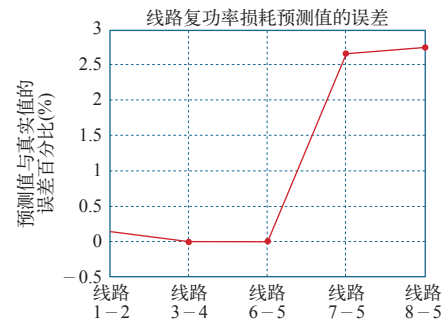


图2 线路1-2、3-4、6-5、7-5和8-5的损耗预测值与实际值比较结果

误差计算方法为

$$\text{error} = \frac{\|S_L^{\text{real}} - S_L^{\text{forecast}}\|_2}{\|S_L^{\text{real}}\|_2} \times 100\% \quad (18)$$

式中, S_L^{real} 为损耗的实际值; S_L^{forecast} 为预测值。

从图2可见, 支路损耗的预测值误差较低, 说明模型具有较高的准确度。

根据回归得到的式 (17), 可以得到节点2、4和5的源特性规律模型, 即

$$\begin{aligned} S_2 &= S_1 - S_L^{1 \rightarrow 2} \\ S_4 &= S_3 - S_L^{3 \rightarrow 4} \end{aligned} \quad (19)$$

$$S_5 = (S_6 - S_L^{6 \rightarrow 5}) + (S_7 + S_L^{7 \rightarrow 5}) + (S_8 + S_L^{8 \rightarrow 5})$$

2. 微缩电网节点电压调控规律模型

将源特性模型融入式 (6) 中, 得到节点电压的可控解析表达式为

$$\begin{cases} \hat{S}^T \beta_{11} S + \hat{S}^T \beta_{12} + S \beta_{13} + \beta_{14} + \beta_{15} (\hat{S}_7 + \hat{S}_8) = V_2 \\ \hat{S}^T \beta_{21} S + \hat{S}^T \beta_{22} + S \beta_{23} + \beta_{24} + \beta_{25} (\hat{S}_7 + \hat{S}_8) = V_4 \\ \hat{S}^T \beta_{31} S + \hat{S}^T \beta_{32} + S \beta_{33} + \beta_{34} + \beta_{35} (\hat{S}_7 + \hat{S}_8) = V_5 \end{cases} \quad (20)$$

其中, $\hat{S}^T = [\hat{S}_1 \ \hat{S}_3 \ \hat{S}_6]$; $S = [S_1 \ S_3 \ S_6]^T$; β_{11} 、 β_{21} 、 β_{31} 、 β_{12} 、 β_{22} 、 β_{32} 、 β_{13} 、 β_{23} 和 β_{33} 为待回归的复系数矩阵; β_{14} 、 β_{15} 、 β_{24} 、 β_{25} 、 β_{34} 和 β_{35} 为待

回归的复系数。

同样，使用上述90组 S_1 、 S_3 、 S_6 、 S_7 、 S_8 、 V_2 、 V_4 和 V_5 的量测数据作为样本，使用最小二乘

回归方法估计上述系数，并采用另外10组 S_1 、 S_3 、 S_6 、 S_7 、 S_8 、 V_2 、 V_4 和 V_5 的量测数据对其回归系数进行测试，测试结果如表1所示。

表1 微缩电网节点电压预测值与实际值比较结果

样本	V_2 实际幅值/相角 (°)	V_2 预测幅值/相角 (°)	V_4 实际幅值/相角 (°)	V_4 预测幅值/相角 (°)	V_5 实际幅值/相角 (°)	V_5 预测幅值/相角 (°)
1	1.012 1/0.056 5	1.012 0/0.056 6	0.994 0/0.183 2	0.992 1/0.189 3	0.976 7/1.126 1	0.952 6/1.169 8
2	1.012 3/-0.060 9	1.012 3/-0.061 0	0.994 6/-0.197 5	0.995 3/-0.199 7	0.978 3/0.716 6	0.983 9/0.711 5
3	1.011 5/0.225 9	1.011 7/0.225 8	0.992 4/0.733 6	0.990 9/0.722 5	0.971 3/2.051 6	0.962 6/1.987 1
4	1.012 3/0.270 7	1.012 3/0.271 0	0.994 8/0.877 7	0.998 1/0.884 4	0.978 8/2.609 9	1.009 8/2.638 6
5	1.012 1/0.159 3	1.012 1/0.159 3	0.994 3/0.516 5	0.992 4/0.517 6	0.977 3/1.756 5	0.963 2/1.778 3
6	1.012 2/0.089 1	1.012 2/0.089 3	0.994 5/0.289 1	0.994 1/0.292 6	0.977 6/1.676 7	0.977 4/1.685 1
7	1.012 1/0.199 7	1.012 1/0.199 5	0.994 1/0.647 8	0.992 6/0.642 3	0.977 1/1.883 0	0.971 0/1.878 5
8	1.011 6/0.306 7	1.011 8/0.307 3	0.992 7/0.995 8	1.000 5/1.003 8	0.972 1/2.672 0	0.990 2/2.657 8
9	1.011 6/0.226 2	1.011 8/0.226 5	0.992 7/0.734 4	0.994 9/0.736 4	0.971 7/2.315 0	0.978 2/2.299 5
10	1.012 6/0.080 2	1.012 5/0.080 3	0.995 6/0.259 7	0.994 7/0.262 0	0.981 5/1.521 8	0.970 3/1.541 2
误差	—	0.024 93%	—	0.644 5%	—	3.271 0%

由表1可以看出，所建立的源特性模型、微缩电网节点电压模型预测出来结果都具有较高的准确度，其中预测的节点电压误差都在4%以下，因此所建立的模型具有较高的准确度水平。

3. 微缩电网关键节点电压调控规律模型

由表1可见，节点5是关键节点且具有单源性，假设不存在输电线路潮流越限，那么可以进一步建立节点4、5的源特性模型并将微缩电网微缩至关键节点5。

建立节点4、5的源特性模型为

$$\begin{aligned} S'_4 &= (S_2 - S_L^{2 \rightarrow 4}) + (S_3 - S_L^{3 \rightarrow 4}) \\ &= S_1 - S_L^{1 \rightarrow 2} - S_L^{2 \rightarrow 4} + S_3 - S_L^{3 \rightarrow 4} \\ S'_5 &= S_5 + S'_4 - S_L^{4 \rightarrow 5} \\ &= S_6 - S_L^{6 \rightarrow 5} + S_7 + S_L^{7 \rightarrow 5} + S_8 + S_L^{8 \rightarrow 5} + S_1 - \\ &\quad S_L^{1 \rightarrow 2} - S_L^{2 \rightarrow 4} + S_3 - S_L^{3 \rightarrow 4} - S_L^{4 \rightarrow 5} \\ &= S_1 + S_3 + S_6 + S_7 + S_8 - (S_L^{1 \rightarrow 2} + S_L^{2 \rightarrow 4} + \\ &\quad S_L^{3 \rightarrow 4} + S_L^{4 \rightarrow 5} + S_L^{6 \rightarrow 5} - S_L^{7 \rightarrow 5} - S_L^{8 \rightarrow 5}) \end{aligned} \quad (21)$$

将源特性模型 (21) 代入式 (10) 中，得到关键节点的调控规律模型为

$$\beta[\hat{S}_1 + \hat{S}_3 + \hat{S}_6 + \hat{S}_7 + \hat{S}_8 - (\hat{S}_L^{1 \rightarrow 2} + \hat{S}_L^{2 \rightarrow 4} + \hat{S}_L^{3 \rightarrow 4} + \hat{S}_L^{4 \rightarrow 5} + \hat{S}_L^{6 \rightarrow 5} - \hat{S}_L^{7 \rightarrow 5} - \hat{S}_L^{8 \rightarrow 5})] = V_5 \quad (22)$$

同样使用表1的量测数据进行最小二乘系数估计及使用其余10组样本作测试，测试结果如表2所示。

由表2可见，使用模型 (22) 预测 V_5 的误差为

表2 关键节点电压预测值与实际值比较结果

样本	V_5 实际幅值/相角 (°)	模型 (22) V_5 预测幅值/相角 (°)
1	0.976 7/1.126 1	0.952 6/1.171 1
2	0.978 3/0.716 6	0.983 9/0.711 1
3	0.971 3/2.051 6	0.959 3/1.982 9
4	0.978 8/2.609 9	1.010 7/2.638 7
5	0.977 3/1.756 5	0.961 5/1.777 0
6	0.977 6/1.676 7	0.975 7/1.682 9
7	0.977 1/1.883 0	0.970 8/1.878 3
8	0.972 1/2.672 0	0.986 5/2.656 3
9	0.971 7/2.315 0	0.978 7/2.298 3
10	0.981 5/1.521 8	0.969 6/1.538 9
误差	—	3.370 7%

3.370 7%，与模型 (20) 预测的误差很接近，说明具有较高的可信度，且模型 (22) 物理意义明确、表达形式直观，因此可以直接用来预测关键节点的电压水平。

结束语

本文提出了一种微缩电网的新概念及其等效计算的新模型，通过算例表明，所提模型计算量较小、计算准确度较高，能够满足原始电网关键节点分析和控制的需要，对于简化原始电网节点电压的监视和调控具有重要意义。

(收稿日期：2015-02-10) EA