

广域环境下基于 Q 型因子学习方法的电网节点聚合规律

郝广涛¹, 韩学山¹, 梁 军¹, 负志皓¹, 董晓明², 张学清³

(1. 山东大学 电网智能化调度与控制教育部重点实验室, 山东 济南 250061;

2. 清华大学 电机系 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084;

3. 济南市供电公司, 山东 济南 250012)

摘要: 大规模可再生能源的并网以及电力市场解除管制的改革, 使传统集中式的节点电压在线安全分析、调度与控制方法面临困境。对此, 在电网运行状况全景过程化可观测条件下, 提出了渐进学习的电网节点聚合的新调控理论, 通过电网“局部自治与集中调控互融”的调控方式解决电网的调控问题。提出了基于 Q 型因子学习的电网节点聚合规律的挖掘方法, 根据传统节点电压方程及发电机、负荷的等值模型得到广域环境下节点电压向量与电势之间的解析关系, 推导出连续 2 个量测时刻下节点电压幅值变化的影响因子, 并对其进行过程化的 Q 型因子学习, 进而得到电压幅值具有一致变化的节点聚合规律。通过对德州电网的仿真分析, 验证了所提方法的准确性及有效性。

关键词: 电力系统; 全景过程化可观测; 渐进学习; 局部自治与集中调控互融; 节点聚合; Q 型因子; 模型; 广域测量; 调控

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.01.018

0 引言

随着风、光、储等可再生能源以分散或集中的方式大规模并入电网, 加之大型机组、特高压的发展^[1], 电网规模日益庞大, 电网结构渐进地发生改变。同时, 电力工业正在进行解除管制的改革, 公平竞争机制的引入, 打乱了传统输电与配电功能明确的固有模式, 使传统逻辑清晰的潮流流向逐渐不清晰, 节点的电源或负荷特性日趋模糊。在市场机制的驱使下, 输电元件的流量不断趋于输电极限, 电力系统的运行点也越来越逼近其稳定边缘, 整个系统发生电压失稳甚至电压崩溃的危险不断增加, 使传统集中式的电网在线安全分析与计算方法面临困境, 已引起国内外学者的高度重视^[2-5]。对此, 国内外电力科学工作者纷纷加入这一研究之中, 研究与实践的焦点主要集中在基于电网等值的电压稳定裕度计算^[6-10]、基于电压稳定机理的指标研究^[11-12]、基于连续潮流的电压稳定研究^[13-14]、基于机器学习的电压稳定评估方法^[15-18]等方面, 目的是使其依然满足集中的管理和调控模式, 没有摆脱传统理念的束缚。可见, 伴随大规模、分布分散方式的风、光、储电源不断地涌入电网, 源(含负荷)网流的分配呈现不均衡性, 源网流的流向呈现不清晰性, 源网流的调控呈现时空关联性, 如果继续按传统集中式的理念予以分析和计算, 必将造成电网的低效率运行,

使调控呈现尴尬局面, 由此, 传统电压的安全分析、调控的思想必须变革, 同时也切合智能电网的建设思想^[19-20]。

针对上述情况, 本文提出了电网节点聚合的理论思想, 广域测量系统(WAMS)技术的发展和成熟^[21-22]为此研究提供了基础。电网节点聚合理论研究的目的是将复杂的分布式大电网节点电压的安全分析、调控简化, 解决电网因难以固定划分而无法有效调控的难题。

电网节点聚合理论与传统电网等值简化理论具有质的不同, 传统电网等值简化方法^[23-25]是从静态的观念出发, 对系统的网络结构进行一系列的等值简化计算, 用于未来一段时间内电网运行、分析和控制。该类方法以静态网络结构参数为基础, 保留感兴趣的网络元件, 对网络其他部分进行等值, 等值后的虚拟元件及其潮流无任何实际意义, 简化后的网络导纳矩阵不稀疏, 等值后的网络无法应对系统的动态变化。而电网节点聚合理论是以 WAMS 全景过程化的量测数据为基础, 从中挖掘出电压幅值具有一致性变化规律的节点, 从而形成节点聚合规律。随着系统渐进地运行, 该规律随之逐渐地改进, 最终形成系统稳定的内在规律。当然, 对于不同的研究时段, 该规律具有不同的结果。得到节点聚合规律之后, 整个电网就可以简化成若干个节点聚合间相互协调、节点聚合内部独立自主的运行体系, 从而形成分散、分布、微型化的局部自治与集中调控互融的电网运行、调度和控制的新模式。

本文以电网节点聚合理论思想为导引, 对其基础规律进行研究, 提出了基于 Q 型因子学习的节点

收稿日期: 2014-03-04; 修回日期: 2014-11-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51177091)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51177091)

聚合规律的挖掘方法。首先从传统节点电压相量与注入电流相量之间的关系出发,利用发电机及负荷的等效模型推导得到节点电压相量与其可控量之间的解析关系,以此为基础,提出了控制节点电压幅值变化的影响因子,对该影响因子的过程化学习,得到电压幅值具有一致性变化的节点聚类,从而形成节点聚合规律。实际算例表明,该规律是实际存在的,本文方法能够准确地获得该规律。

1 广域环境下节点电压相量与注入电流相量之间的关系

在广域量测环境下(忽略因量测环节所引起的误差),各母线电压相量、电流注入相量都可视为已知的量,那么对于含有 n 个节点(大地为参考节点)的电网(假设电网结构不变化)而言,总可以按照传统电网分析理论将节点电压和电流相量间的关系表示为如下的线性形式:

$$\begin{cases} z_{11}I_1 + z_{12}I_2 + \dots + z_{1n}I_n = U_1 \\ z_{21}I_1 + z_{22}I_2 + \dots + z_{2n}I_n = U_2 \\ \vdots \\ z_{n1}I_1 + z_{n2}I_2 + \dots + z_{nn}I_n = U_n \end{cases} \quad (1)$$

其中, I_1, I_2, \dots, I_n 为 n 个节点的注入电流相量; U_1, U_2, \dots, U_n 为 n 个节点的电压相量; $z_{ij} (i, j = 1, 2, \dots, n)$ 为传统电网分析理论中的节点阻抗参数。

在传统电网分析理论中节点阻抗参数 z_{ij} 假设为不变的量,但在实际中 z_{ij} 随着系统的运行,渐进地发生变化。通过使用 n 次节点电压和电流相量的量测数据,能够计算得到式(1)中的 z_{ij} ,随着 n 次采样窗口的不断移动,就能得到随系统运行的参数 z_{ij} 。

2 广域环境下节点电压相量与电势的关系

在双机电力系统中,发电机 G_1 向 G_2 输送电能,可表示为如图 1 所示的形式。

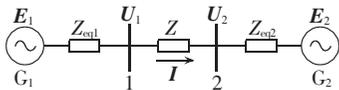


图 1 双机电力系统

Fig.1 Dual-generator power system

其节点注入电流相量可分别表示为^[26-27]:

$$I_1 = \frac{E_1 - U_1}{Z_{eq1}}, \quad I_2 = \frac{U_2 - E_2}{Z_{eq2}} \quad (2)$$

其中, E_1, E_2 分别为发电机和负荷的电势; U_1, U_2 分别为节点 1、2 的电压相量; Z_{eq1}, Z_{eq2} 为等效阻抗。

在广域环境下,系统节点注入电流相量、电压相量可视为已知的量,则根据戴维南等效参数的估计方法^[28-29]可以得到式(2)中发电机电势、负荷电势及其等效阻抗参数。

假设系统有 g 个电源节点(节点编号设为 1、2、

\dots, g)、 q 个负荷节点(节点编号设为 $g+1, g+2, \dots, g+q$),其余为联络节点,则将式(2)中的节点注入电流代入式(1)中得:

$$\begin{cases} a_{1,1}(E_1 - U_1) + a_{1,2}(E_2 - U_2) + \dots + a_{1,g+q}(E_{g+q} - U_{g+q}) = U_1 \\ a_{2,1}(E_1 - U_1) + a_{2,2}(E_2 - U_2) + \dots + a_{2,g+q}(E_{g+q} - U_{g+q}) = U_2 \\ \vdots \\ a_{n,1}(E_1 - U_1) + a_{n,2}(E_2 - U_2) + \dots + a_{n,g+q}(E_{g+q} - U_{g+q}) = U_n \end{cases} \quad (3)$$

其中, $a_{i,j} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, g+q)$ 为复系数,按照传统电力系统分析理论,其具有阻抗的形式:

$$a_{i,j} = \begin{cases} z_{ij}/z_{eqj} & i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, g \\ -z_{ij}/z_{eqj} & i = 1, 2, \dots, n; j = g+1, g+2, \dots, g+q \end{cases}$$

将式(3)进一步整理得:

$$U = A^{-1}A_0E \quad (4)$$

$$U = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_{g+q} \\ U_{g+q+1} \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix}, \quad A_0 = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,g+q} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \dots & a_{2,g+q} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n,1} & a_{n,2} & \dots & a_{n,g+q} \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 1+a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,g+q} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ a_{2,1} & 1+a_{2,2} & \dots & a_{2,g+q} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{g+q,1} & a_{g+q,2} & \dots & 1+a_{g+q,g+q} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ a_{g+q+1,1} & a_{g+q+1,2} & \dots & a_{g+q+1,g+q} & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n,1} & a_{n,2} & \dots & a_{n,g+q} & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_{g+q} \end{bmatrix}$$

$$\text{记 } B = A^{-1}A_0 = \begin{bmatrix} b_{1,1} & b_{1,2} & \dots & b_{1,g+q} \\ b_{2,1} & b_{2,2} & \dots & b_{2,g+q} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{n,1} & b_{n,2} & \dots & b_{n,g+q} \end{bmatrix}, \text{ 则式(4)}$$

可以进一步展开表示为:

$$\begin{cases} b_{1,1}E_1 + b_{1,2}E_2 + \dots + b_{1,g+q}E_{g+q} = U_1 \\ b_{2,1}E_1 + b_{2,2}E_2 + \dots + b_{2,g+q}E_{g+q} = U_2 \\ \vdots \\ b_{n,1}E_1 + b_{n,2}E_2 + \dots + b_{n,g+q}E_{g+q} = U_n \end{cases} \quad (5)$$

其中, $b_{i,j} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, g+q)$ 为复系数。式(5)表示系统 n 个节点电压相量与 $g+q$ 个节点电势之间的线性解析关系。

在广域量测环境下,式(5)中的节点电势在任意时刻下都能够通过量测或戴维南等效参数估计

方法得到,那么就可以通过滚动学习的方式得到随系统运行的系数 b_{ij} 。

3 广域环境下影响节点电压幅值变化因子

式(5)给出了广域环境下节点电压相量与节点电势之间的关系,设 t 时刻及 $t+1$ 时刻节点电压相量 U_j 的量测关系分别如式(6)、(7)所示。

$$b_{j,1}(t)E_1(t) + b_{j,2}(t)E_2(t) + \dots + b_{j,g+q}(t)E_{g+q}(t) = U_j(t) \quad (6)$$

$$b_{j,1}(t+1)E_1(t+1) + b_{j,2}(t+1)E_2(t+1) + \dots + b_{j,g+q}(t+1)E_{g+q}(t+1) = U_j(t+1) \quad (7)$$

则在连续 2 个采样时刻下,节点电压幅值的变化量为:

$$\begin{aligned} \Delta U_j &= |U_j(t+1)| - |U_j(t)| = \\ &|b_{j,1}(t+1)E_1(t+1) + \dots + b_{j,g+q}(t+1)E_{g+q}(t+1)| - \\ &|b_{j,1}(t)E_1(t) + \dots + b_{j,g+q}(t)E_{g+q}(t)| = \\ &\sqrt{(H_{j,1}+H_{j,2}+\dots+H_{j,g+q})^2 + (K_{j,1}+K_{j,2}+\dots+K_{j,g+q})^2} - \\ &\sqrt{(H'_{j,1}+H'_{j,2}+\dots+H'_{j,g+q})^2 + (K'_{j,1}+K'_{j,2}+\dots+K'_{j,g+q})^2} \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $H_{j,k}, K_{j,k} (k=1, 2, \dots, g+q)$ 分别为 $b_{j,k}(t+1) \times E_k(t+1)$ 的实部和虚部; $H'_{j,k}, K'_{j,k}$ 分别为 $b_{j,k}(t)E_k(t)$ 的实部和虚部。

根据文献[30]复数模值的近似计算方法:

$$\begin{aligned} \sqrt{H^2+K^2} &\approx \\ &\begin{cases} \max\left[\frac{7}{8}|H| + \frac{1}{2}|K|, |H|\right] & |H| \geq |K| \\ \max\left[\frac{7}{8}|K| + \frac{1}{2}|H|, |K|\right] & |H| < |K| \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

由于本文不仅要找到影响电压幅值变化的变量,而且要以此能够判断各个节点电压幅值的变化方向,便于聚类,因此将式(9)的方法改进为:

$$\begin{aligned} |U_j(t+1)| &= \sqrt{(H_{j,1}+\dots+H_{j,g+q})^2 + (K_{j,1}+\dots+K_{j,g+q})^2} = \\ &\begin{cases} \max\left[\frac{7}{8}|H| + \frac{1}{2}|K|, |H|\right] + \varepsilon_{j0} & |H| \geq |K| \\ \max\left[\frac{7}{8}|K| + \frac{1}{2}|H|, |K|\right] + \varepsilon_{j1} & |H| < |K| \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

其中, $H=H_{j,1}+\dots+H_{j,g+q}, K=K_{j,1}+\dots+K_{j,g+q}; \varepsilon_{j0}, \varepsilon_{j1}$ 为残差,可通过移项计算得到。

在广域环境下,通过判断式(8)中节点电压相量的实部和虚部大小就可以得到式(10)的简化形式。同理, $|U_j(t)|$ 也有如式(10)的表示形式,则式(8)可以展开表示为:

$$\begin{aligned} \Delta U_j &= M - N \\ M &= \begin{cases} \max\left[\frac{7}{8}|H| + \frac{1}{2}|K|, |H|\right] + \varepsilon_{j0} & |H| \geq |K| \\ \max\left[\frac{7}{8}|K| + \frac{1}{2}|H|, |K|\right] + \varepsilon_{j1} & |H| < |K| \end{cases} \end{aligned}$$

$$N = \begin{cases} \max\left[\frac{7}{8}|H'| + \frac{1}{2}|K'|, |H'|\right] + \varepsilon'_{j0} & |H'| \geq |K'| \\ \max\left[\frac{7}{8}|K'| + \frac{1}{2}|H'|, |K'|\right] + \varepsilon'_{j1} & |H'| < |K'| \end{cases} \quad (11)$$

其中, $H'=H'_{j,1}+H'_{j,2}+\dots+H'_{j,g+q}, K'=K'_{j,1}+K'_{j,2}+\dots+K'_{j,g+q}, H'_{j,k}, K'_{j,k}$ 分别为 $b_{j,k}(t)E_k(t)$ 的实部和虚部。

对于不同的节点,式(11)中 $|H|$ 和 $|K|$ 大小不同,假设 $|H| \geq |K|, |H'| \geq |K'|$ (其他情况形式类同),式(11)可以展开为:

$$\begin{aligned} \Delta U_j &= \max\left[\frac{7}{8}|H| + \frac{1}{2}|K|, |H|\right] + \varepsilon_{j0} - \\ &\max\left[\frac{7}{8}|H'| + \frac{1}{2}|K'|, |H'|\right] - \varepsilon'_{j0} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\text{当 } \max\left[\frac{7}{8}|H| + \frac{1}{2}|K|, |H|\right] = \frac{7}{8}|H| + \frac{1}{2}|K|$$

且 $\max\left[\frac{7}{8}|H'| + \frac{1}{2}|K'|, |H'|\right] = \frac{7}{8}|H'| + \frac{1}{2}|K'|$ 时,

式(12)可以展开为:

$$\begin{aligned} \Delta U_j &= \left(\frac{7}{8}|H| + \frac{1}{2}|K|\right) - \left(\frac{7}{8}|H'| + \frac{1}{2}|K'|\right) + \Delta\varepsilon_j = \\ &\frac{7}{8}(|H| - |H'|) + \frac{1}{2}(|K| - |K'|) + \Delta\varepsilon_j \end{aligned} \quad (13)$$

其中, $\Delta\varepsilon_j = \varepsilon_{j0} - \varepsilon'_{j0}$ 。

通过判断式(13)中实部和虚部正负号就可以将绝对值消去,从而得到电压幅值变化的各个变量,表示为:

$$\begin{aligned} \Delta U_j &= \frac{7}{8}(\Delta H_{j,1} + \dots + \Delta H_{j,g+q}) + \\ &\frac{1}{2}(\Delta K_{j,1} + \dots + \Delta K_{j,g+q}) + \Delta\varepsilon_j = \\ &\left(\frac{7}{8}\Delta H_{j,1} + \frac{1}{2}\Delta K_{j,1} + \frac{\Delta\varepsilon_j}{g+q}\right) + \dots + \\ &\left(\frac{7}{8}\Delta H_{j,g+q} + \frac{1}{2}\Delta K_{j,g+q} + \frac{\Delta\varepsilon_j}{g+q}\right) = \end{aligned} \quad (14)$$

因此,可以将节点电压幅值的变化表示为:

$$\begin{cases} \Delta U_1 = x_{1,1} + x_{1,2} + \dots + x_{1,g+q} \\ \Delta U_2 = x_{2,1} + x_{2,2} + \dots + x_{2,g+q} \\ \vdots \\ \Delta U_n = x_{n,1} + x_{n,2} + \dots + x_{n,g+q} \end{cases} \quad (15)$$

对 $\max\left[\frac{7}{8}|H| + \frac{1}{2}|K|, |H|\right] = \frac{7}{8}|H| + \frac{1}{2}|K|$

且 $\max\left[\frac{7}{8}|H'| + \frac{1}{2}|K'|, |H'|\right] = |H'|$ 或者其他情况,推导类似,都有式(15)的表示形式,只不过影响

因子取不同的值,该影响因子可作为一种理想的控制目标或方向,随之可通过不同的方法反推得到具体的实际控制量。

式(15)中节点电压幅值的变化量都可以表示

为 $g+q$ 个变量和的形式,根据因子分析理论^[31],可将 n 个节点电压幅值的变化量 $\Delta U_1, \Delta U_2, \dots, \Delta U_n$ 抽象为 n 个样品,每个样品都由 $g+q$ 个影响因子所决定。例如,对于样品 $\Delta U_j, x_{j,1}, x_{j,2}, \dots, x_{j,g+q}$ 为对应于 $g+q$ 个影响因子下的采样值。

因此,研究节点电压幅值一致性变化规律就是研究其 $g+q$ 个影响因子的变化规律。若某些节点电压幅值的变化由同一个影响因子所决定,则这些节点可以聚为一类。然而,这 $g+q$ 个影响因子之间存在较强的相关性,其采样值之间存在较大的信息重叠,不利于分析样品之间的聚类规律,因此需要对其进行去相关性建模。

4 Q 型因子聚类学习模型

4.1 Q 型因子分析模型

Q 型因子分析是因子分析方法中的一种,主要研究样品之间的相似关系^[31]。它通过对样品的相似矩阵内部结构的研究找出控制所有样品的几个主要因子,通过对因子载荷矩阵的正交变换,使每个样品只在一个因子上具有较大的载荷,通过判断不同样品在各个因子上载荷的相对大小来构造聚类准则^[32]:如果某几个样品在同一个因子上都有相对较大的载荷,则说明这几个样品与该因子同时具有较强的相似性,可以聚为一类;若某几个样品在另一个因子上具有较大的载荷,则说明这几个样品与该因子同时具有较强的相似性,于是这几个样品可以聚为另一类。

对于由 n 个样品 $\mathbf{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)^T$ 和 p 个变量 $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_p)^T$ 构成的 $n \times p$ 维样本矩阵, Q 型因子分析就是把 n 个样品分别表示为 m 个互不相关的公共因子 $\mathbf{F} = (F_1, F_2, \dots, F_m)^T$ 和残差 $\boldsymbol{\varepsilon} = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n)^T$ 的线性加权和:

$$\begin{cases} Y_1 = c_{11}F_1 + c_{12}F_2 + \dots + c_{1m}F_m + \varepsilon_1 \\ Y_2 = c_{21}F_1 + c_{22}F_2 + \dots + c_{2m}F_m + \varepsilon_2 \\ \vdots \\ Y_n = c_{n1}F_1 + c_{n2}F_2 + \dots + c_{nm}F_m + \varepsilon_n \end{cases} \quad (16)$$

将式(16)表示成矩阵形式为:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{CF} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (17)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1m} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nm} \end{bmatrix}$$

其中, \mathbf{C} 为因子载荷矩阵。

如果样本数据是经过标准化处理的,则矩阵 \mathbf{C} 就是随机向量 \mathbf{Y} 和 \mathbf{F} 的相似系数矩阵, c_{ij} 就是 Y_i 与 F_j 的相似系数。与主成分分析法确定主成分个数

的方法相同,当前 m 个公共因子的累积贡献率达到一定的精度要求时,前 m 个公共因子就能够代表原始变量的绝大部分信息。当提取的公共因子数目足够多(不超过原变量个数)的时候,残差因子可以省略。

4.2 Q 型因子最优聚类模型

由式(17)得到的初始因子载荷矩阵 \mathbf{C} 一般不满足“简单结构准则”,即各个样品在不同公共因子上载荷的绝对值差别不是很明显,需要对其进行方差最大的正交旋转变换^[33-34],使每个样品仅在 1 个公共因子上有绝对值较大的载荷,而在其他公共因子上的载荷较小,从而使各个样品更密集地聚集在不同的因子轴附近,有助于样品聚类分析。构造模型如下:

$$\max \psi = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \frac{(\omega_{ij}^2 - \bar{\omega}_j)^2}{n} \quad (18)$$

$$h_i^2 = \sum_{j=1}^m c_{ij}^2 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (19)$$

$$\omega_{ij}^2 = \frac{c_{ij}^2}{h_i^2} \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m \quad (20)$$

$$\bar{\omega}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \omega_{ij}^2 \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (21)$$

模型(18)的优化计算步骤如下。

- 根据式(19)计算共同度 $h_i^2 (i = 1, 2, \dots, n)$ 。
- 根据式(20)对因子载荷矩阵标准化以消除量纲及各变量对公共因子依赖程度的影响。
- 根据式(21)计算 $\bar{\omega}_j$ 。
- 将获得的各个参量代入式(18)中计算初始载荷矩阵方差 $\psi^{(0)}$ 。

e. 取正交矩阵 $\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \cos \delta & -\sin \delta \\ \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix}$ (δ 指由 2 个因子确定的平面所要旋转的角度,详见文献[31]),

对 \mathbf{C} 中任意 2 列 $[\mathbf{C}_i \quad \mathbf{C}_j] = \begin{bmatrix} c_{1i} & c_{1j} \\ c_{2i} & c_{2j} \\ \vdots & \vdots \\ c_{ni} & c_{nj} \end{bmatrix} (i \neq j)$ 进行正

交变换:

$$[\mathbf{C}_i \quad \mathbf{C}_j] \mathbf{F} = \begin{bmatrix} c_{1i} \cos \delta_j + c_{1j} \sin \delta_j & -c_{1i} \sin \delta_j + c_{1j} \cos \delta_j \\ c_{2i} \cos \delta_j + c_{2j} \sin \delta_j & -c_{2i} \sin \delta_j + c_{2j} \cos \delta_j \\ \vdots & \vdots \\ c_{ni} \cos \delta_j + c_{nj} \sin \delta_j & -c_{ni} \sin \delta_j + c_{nj} \cos \delta_j \end{bmatrix} \quad (22)$$

其中, δ_j 为由 $\mathbf{C}_i, \mathbf{C}_j$ 2 个因子确定的平面所要旋转的角度。

f. 将式(22)正交变换后的矩阵代入式(18)中,对 δ_j 计算一阶导数并令其为 0,得到 $\mathbf{C}_i, \mathbf{C}_j$ 方差之和达到最大时 δ_j 的方程:

$$\tan(4\delta_{\bar{y}}) = \frac{\xi - 2\alpha\beta/n}{\eta - (\alpha^2 - \beta^2)/n} \quad (23)$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{c_{\bar{i}}}{h_i} \right)^2 - \left(\frac{c_{\underline{i}}}{h_i} \right)^2 \right], \quad \beta = 2 \sum_{i=1}^n \frac{c_{\bar{i}} c_{\underline{i}}}{h_i^2}$$

$$\xi = 4 \sum_{i=1}^n \frac{c_{\bar{i}} c_{\underline{i}}}{h_i^2} \left[\left(\frac{c_{\bar{i}}}{h_i} \right)^2 - \left(\frac{c_{\underline{i}}}{h_i} \right)^2 \right]$$

$$\eta = \sum_{i=1}^n \left\{ \left[\left(\frac{c_{\bar{i}}}{h_i} \right)^2 - \left(\frac{c_{\underline{i}}}{h_i} \right)^2 \right]^2 - \left(2 \frac{c_{\bar{i}} c_{\underline{i}}}{h_i^2} \right)^2 \right\}$$

g. 按照步骤 e、f 对 C 中的每 2 列进行正交旋转变换, 全部旋转完毕称为一轮循环, 经过第 1 轮旋转后计算所得的因子载荷方差为 $\psi^{(1)}$, 旋转后的因子载荷矩阵为 $C^{(1)}$, 以 $C^{(1)}$ 进行第 2 轮旋转, 如此循环不断, 直到 $\psi^{(k)}$ 不再增大为止, 此时的因子载荷矩阵 $C^{(k)}$ 具有较强的聚类能力。

5 广域环境下电网节点聚合规律的渐进学习方法

5.1 连续 2 个采样时刻下节点聚合规律的学习方法

在连续 2 个采样时刻下, 节点电压幅值的变化有如式(15)的解析关系, 对此时 n 个节点电压幅值变化的 $g+q$ 个影响因子进行采样, 设采样数据阵为:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,g+q} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,g+q} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n,1} & x_{n,2} & \cdots & x_{n,g+q} \end{bmatrix} \quad (24)$$

由于研究的是样品之间的聚类问题, 因此对 \mathbf{X} 按行进行标准差标准化^[35]:

$$x_{i,j}^* = \frac{x_{i,j} - \bar{x}_i}{s_i} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (25)$$

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{i,j}, \quad s_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{i,j} - \bar{x}_i)^2}$$

记标准化后的矩阵为 $\mathbf{X}^* = (x_{i,j}^*)_{n \times n}$, 计算 \mathbf{X}^* 中第 i ($i = 1, 2, \dots, n$) 个样品 $\mathbf{X}_{(i)}^* = (x_{i,1}^*, x_{i,2}^*, \dots, x_{i,n}^*)^T$ 和第 j ($j = 1, 2, \dots, n$) 个样品 $\mathbf{X}_{(j)}^* = (x_{j,1}^*, x_{j,2}^*, \dots, x_{j,n}^*)^T$ 的相似度:

$$q_{ij} = \cos \langle \mathbf{X}_{(i)}^*, \mathbf{X}_{(j)}^* \rangle = \frac{\sum_{l=1}^n (x_{i,l}^* x_{j,l}^*)}{\sqrt{\sum_{l=1}^n (x_{i,l}^*)^2 \sum_{l=1}^n (x_{j,l}^*)^2}} \quad (26)$$

从而得到 n 个样品间的相似度矩阵 $\mathbf{Q} = (q_{ij})_{n \times n}$, 计算 \mathbf{Q} 的特征值和特征向量, 记 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n \geq 0$ 为 \mathbf{Q} 的特征值, 其相应的正交特征向量为 $\mathbf{l}_1, \mathbf{l}_2, \dots, \mathbf{l}_n$ 。设 η_{\max} 为前 m 个公共因子的累积贡献率阈值, 则所取公共因子的个数 m 为:

$$\frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_m}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \geq \eta_{\max} \quad (27)$$

令 $\mathbf{C}_i = \sqrt{\lambda_i} \mathbf{l}_i$ ($i = 1, 2, \dots, m$), 则因子载荷矩阵为 $\mathbf{C} = (\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2, \dots, \mathbf{C}_m)$, 所建立的因子载荷模型为:

$$\begin{cases} \Delta U_1 = c_{11} F_1 + c_{12} F_2 + \dots + c_{1m} F_m \\ \Delta U_2 = c_{21} F_1 + c_{22} F_2 + \dots + c_{2m} F_m \\ \vdots \\ \Delta U_n = c_{n1} F_1 + c_{n2} F_2 + \dots + c_{nm} F_m \end{cases} \quad (28)$$

其中, $\Delta U_1, \Delta U_2, \dots, \Delta U_n$ 为 n 个节点电压幅值的变化量; F_1, F_2, \dots, F_m 为相互正交的公共因子; $\mathbf{C} = (c_{ij})_{n \times m}$ 为因子载荷矩阵。

对初始因子载荷矩阵 \mathbf{C} 进行方差最大的正交旋转变换, 使每个节点电压相量仅在 1 个公共因子上有绝对值较大的载荷, 设此时的因子载荷矩阵为 $\mathbf{C}^{(k)}$, 相应的公共因子为 $F^{(k)}$, 有:

$$\begin{cases} \Delta U_1 = c_{11}^{(k)} F_1^{(k)} + c_{12}^{(k)} F_2^{(k)} + \dots + c_{1m}^{(k)} F_m^{(k)} \\ \Delta U_2 = c_{21}^{(k)} F_1^{(k)} + c_{22}^{(k)} F_2^{(k)} + \dots + c_{2m}^{(k)} F_m^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta U_n = c_{n1}^{(k)} F_1^{(k)} + c_{n2}^{(k)} F_2^{(k)} + \dots + c_{nm}^{(k)} F_m^{(k)} \end{cases} \quad (29)$$

通过判断式(29)每一列因子载荷绝对值的大小就可以得到节点电压幅值与该公共因子的依赖程度, 从而可以得到由 t 至 $t+1$ 连续 2 个时间断面下电压幅值一致性发生变化的节点聚合规律。

5.2 渐进学习的节点聚合规律

本文研究的节点聚合规律设定为日时间级, 根据 WAMS 采集一天内系统过程化的运行数据, 按照式(24)~(29)的步骤进行连续不断地学习, 并滚动地修正以前的学习结果, 最终得到一天内节点电压具有一致性变化的规律, 形成节点聚合规律。

该规律是系统一天内实际运行情况的总结, 是一种具有预测和推断能力的规律。

6 算例分析

使用山东德州 220 kV 电网系统(如图 2 所示) 2012 年 11 月 2 日一天内 720 次实际采样数据(每隔 2 s 采集一次)来验证本文所提方法的有效性。

该系统共有 22 个节点、37 条输电线路(含 8 组双回路)、3 个等值发电机和 19 个等值负荷, 节点 12 为平衡节点, 输电元件参数见表 1, 表中电阻、

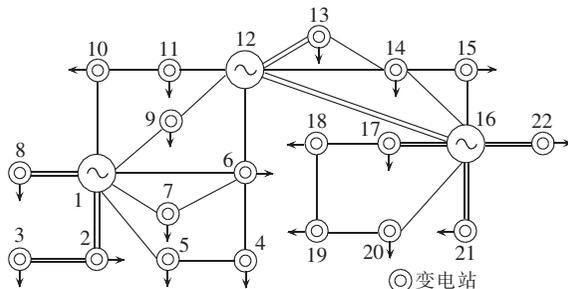


图 2 德州 220 kV 等值接线图

Fig.2 Equivalent wiring diagram of 220 kV Dezhou Grid

表 1 德州电网输电线路参数

Table 1 Transmission line parameters of Dezhou Grid

编号	线路	电阻	电抗	1/2 对地电纳
1	1-2	0.9029	7.1302	0.000042300
2	1-2	0.9067	7.1610	0.000042480
3	1-5	1.9227	15.1844	0.000090070
4	1-6	1.2032	9.5018	0.000056360
5	1-7	0.8779	6.9331	0.000041130
6	1-8	0.5195	4.1026	0.000024340
7	1-8	0.5195	4.1026	0.000024340
8	1-9	2.0147	11.6496	0.000046420
9	1-10	4.7828	27.3936	0.000111200
10	2-3	0.1180	0.7269	0.000004312
11	2-3	0.3460	2.1314	0.000012640
12	4-5	1.0355	8.1774	0.000048510
13	4-6	2.1395	11.2661	0.000037010
14	6-7	0.5601	4.4229	0.000026240
15	6-12	3.2564	17.1475	0.000056330
16	9-12	5.8768	30.9462	0.000101700
17	10-11	0.9122	7.2041	0.000042730
18	11-12	1.3845	10.9340	0.000064860
19	12-13	0.7805	4.1101	0.000013500
20	12-13	0.7805	4.1101	0.000013500
21	12-14	2.6006	10.5264	0.000033110
22	12-16	1.7179	11.7744	0.000068990
23	12-16	2.1826	13.6421	0.000061880
24	13-14	1.1581	6.0981	0.000020030
25	14-15	2.6200	8.6400	0.000026330
26	14-16	0.9445	7.4628	0.000044270
27	15-16	1.6920	10.4227	0.000061830
28	16-17	1.5401	12.1629	0.000072150
29	16-17	1.5386	12.1506	0.000072080
30	16-20	3.0099	17.7185	0.000102200
31	16-21	0.1775	1.4014	0.000008313
32	16-21	0.1771	1.3983	0.000008295
33	16-22	0.9960	6.1354	0.000036400
34	16-22	0.9960	6.1354	0.000036400
35	17-18	2.7772	14.6241	0.000048040
36	18-19	0.8892	5.4772	0.000032490
37	19-20	2.9180	17.9749	0.000106600

电抗、1/2 对地电纳均为标幺值。使用 VS2008 及 MATLAB R2011A 对本文算法进行混合程序编写。

6.1 广域环境下戴维南等效电势辨识

使用文献[28]戴维南等效参数估计方法对德州电网 22 个节点在 720 个采样时刻下进行戴维南等效电势估计,将其与节点电压相量量测数据一起作为后续计算的已知数据。

6.2 广域环境下系统参数学习

根据式(5)22 个节点电压相量与电势之间的解析关系,通过使用 22 个连续的采样数据对其参数进行滚动学习,得到随系统运行的参数矩阵 B 。

6.3 构造学习样本

根据 6.1 及 6.2 节得到的节点电势和参数矩阵 B ,按式(24)的方式构造学习样本,能够得到节点电压幅值连续变化的 719 个数据矩阵,取前 700 个数据矩阵作为本文算法的学习样本。

6.4 连续 2 个采样时刻下节点聚合结果

取第 1 个样本数据矩阵,按式(24)—(28)的步骤进行计算,得到节点电压幅值变化的相似度矩阵,其前 4 个特征值及其贡献率如表 2 所示。

表 2 相似矩阵前 4 个特征值及其贡献率

Table 2 First four eigenvalues and corresponding contribution rates of similar matrix

特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
14.7519	67.05399	67.05399
7.2480	32.9455	99.99945
0.00009936	0.0004516	99.999905
0.00001609	0.00007313	99.99998

本文定义公共因子的累积贡献率阈值为 $\eta_{\max}=99.999\%$,从表 2 可以看出,前 2 个公共因子提供的信息已占总信息量的 99.99945%,基本上能够完全覆盖原变量所含的信息总量。

取前 2 个公共因子,根据式(28)可以得到因子载荷矩阵 C 如式(30)所示,此时 C 的方差为 $\psi^{(0)}=0.2696$,对 C 施行方差最大的正交旋转变换,经过一次变换后得到方差最大的因子载荷矩阵 $C^{(1)}$ 见式(30),此时 $C^{(1)}$ 的方差为 $\psi^{(1)}=0.4418$ 。

$$C = \begin{bmatrix} 0.9733 & 0.2296 \\ 0.9733 & 0.2296 \\ 0.9733 & 0.2296 \\ 0.4299 & -0.9029 \\ 0.4298 & -0.9029 \\ 0.4298 & -0.9029 \\ 0.4299 & -0.9029 \\ 0.9733 & 0.2295 \\ 0.4299 & -0.9029 \\ 0.4301 & -0.9028 \\ 0.4300 & -0.9028 \\ 0.9733 & 0.2296 \\ 0.9733 & 0.2296 \\ 0.9733 & 0.2297 \\ 0.4299 & -0.9029 \\ 0.9733 & 0.2295 \\ 0.9739 & 0.2271 \\ 0.9750 & 0.2222 \\ 0.9755 & 0.2200 \\ 0.9745 & 0.2242 \\ 0.9733 & 0.2295 \\ 0.9733 & 0.2295 \end{bmatrix}, C^{(1)} = \begin{bmatrix} 0.9944 & -0.1052 \\ 0.9944 & -0.1053 \\ 0.9944 & -0.1052 \\ 0.1071 & -0.9942 \\ 0.1070 & -0.9943 \\ 0.1070 & -0.9943 \\ 0.1070 & -0.9943 \\ 0.9944 & -0.1053 \\ 0.1070 & -0.9943 \\ 0.1073 & -0.9942 \\ 0.1071 & -0.9942 \\ 0.9944 & -0.1053 \\ 0.9944 & -0.1053 \\ 0.9945 & -0.1052 \\ 0.1071 & -0.9943 \\ 0.9944 & -0.1053 \\ 0.9942 & -0.1078 \\ 0.9936 & -0.1128 \\ 0.9934 & -0.1150 \\ 0.9938 & -0.1108 \\ 0.9944 & -0.1054 \\ 0.9944 & -0.1054 \end{bmatrix} \quad (30)$$

相对于 C 而言, $C^{(1)}$ 每一列元素的绝对值向 0、1 两极分化,从而使各个样品更密集地聚集在不同的因子轴附近,通过判断 $C^{(1)}$ 各个样品在因子轴上绝对值的大小,就能够得到节点聚类的结果,如表 3 所示。

表 3 前 2 个采样时刻下节点聚类结果

Table 3 Results of node aggregation at premier second sampling instant

聚类编号	德州电网节点号
1	1,2,3,8,12,13,14,16,17,18,19,20,21,22
2	4,5,6,7,9,10,11,15

为了证明本文算法的准确性,取相应于第 1 个数据样本矩阵的 2 个采样时刻,得到如图 3 所示的电压幅值的实际变化情况(标么值)。由图 3 可以看出,本文算法的聚类结果与实际情况相符。

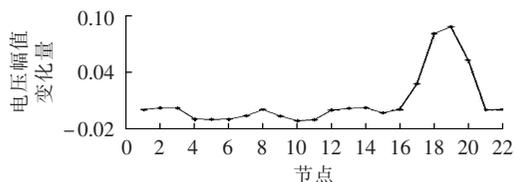


图 3 前 2 个采样时刻下电压幅值实际变化图

Fig.3 Actual voltage magnitude variation at premier second sampling instant

但需要注意,对于表 3 中的聚类是以电压变化的趋势进行分类的,因此虽然节点 4、5、6、7、9、10、11 电气距离与节点 15 较远,但它们具有相同的变化趋势,当然电气距离越近,变化就越趋于一致,但也不排除电气距离远的节点。此时的聚合是一种规律的把握,能够为电网运行人员提供安全分析的参考,若系统运行模式近似不变,那么只要监视或调控该类聚合中的关键节点就可以保证该类的安全。

6.5 过程化的节点聚合规律

按照 6.4 节的步骤,依次进行样本学习,并不断地修正学习结果,前 20、50、200、700 个样本的学习结果分别如表 4—7 所示,相应的实际电压运行情况分别如图 4—7 所示(图中电压幅值为标么值)。

表 4 前 20 个样本的节点聚合学习结果

Table 4 Results of node aggregation learning with premier twenty samples

聚类编号	德州电网节点号	聚类编号	德州电网节点号
1	1,8	5	16,21
2	2,3	6	17,18
3	6,7	7	19,20
4	10,11		

表 5 前 50 个样本的节点电压聚合学习结果

Table 5 Results of node aggregation learning with premier fifty samples

聚类编号	德州电网节点号	聚类编号	德州电网节点号
1	2,3	3	19,20
2	17,18		

表 6 前 200 个样本的节点聚合学习结果

Table 6 Results of node aggregation learning with premier two-hundred samples

聚类编号	德州电网节点号
1	2,3

表 7 前 700 个样本的节点聚合学习结果

Table 7 Results of node aggregation learning with premier seven-hundred samples

聚类编号	德州电网节点号
1	2,3

表中没有列出来的节点号表示其各自单独为一类。

由图 4—7 可以看出,本文方法能够准确地跟踪节点电压幅值的一致性变化情况,并能够将其聚类,随着对样本数据的滚动学习,节点聚类的规律逐渐趋于稳定,因此可以把表 7 的结果作为后续电网一天内运行的规律予以把握,为简化电网分析、监视和调控提供基础。

值得注意的是,表 7 是针对一天时段内的样本,

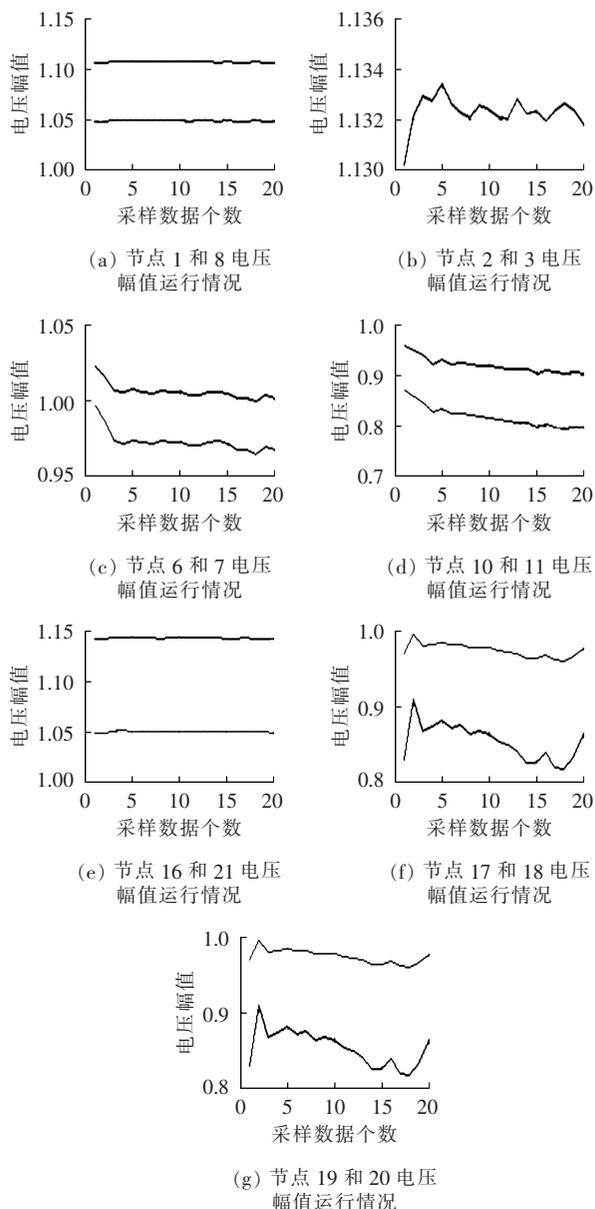
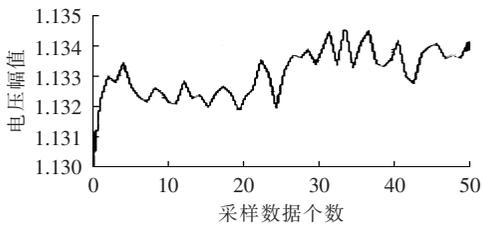
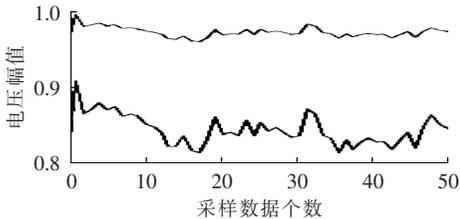


图 4 前 20 个采样时刻下电压实际运行情况

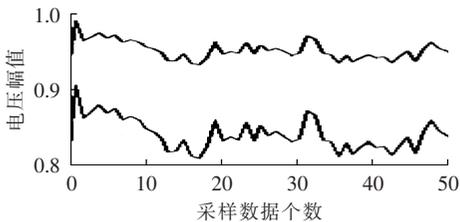
Fig.4 Actual operational voltages at premier twentieth sampling instant



(a) 节点 2 和 3 电压幅值运行情况



(b) 节点 17 和 18 电压幅值运行情况



(c) 节点 19 和 20 电压幅值运行情况

图 5 前 50 个采样时刻下电压实际运行情况
Fig.5 Actual operational voltages at premier fiftieth sampling instant

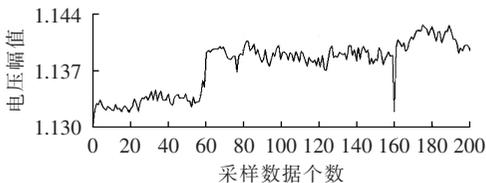


图 6 前 200 个采样时刻下节点 2 和节点 3 电压实际运行情况
Fig.6 Actual operational voltages of node 2 and 3 at premier two-hundredth sampling instant

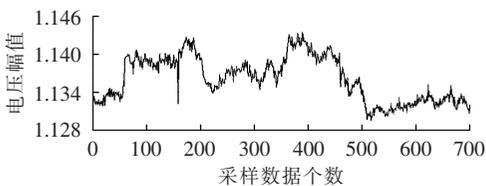


图 7 前 700 个采样时刻下节点 2 和节点 3 电压实际运行情况
Fig.7 Actual operational voltages of node 2 and 3 at premier seven-hundredth sampling instant

对全网进行的变化一致性分析,只有节点 2 和节点 3 变化一致。其他节点在某一时段内具有一致变化特性(如表 3—5 所示),而在一天内没有完全一致变化的。因此,对于一天内不同时间段的电网分析、调度与控制都可以应用上述规律,但需要将该规律缩放至所研究的时段内。

另外,上述过程是严格按照节点电压幅值一致

性变化特征进行的节点聚合规律学习,在不同的精度要求下,可对上述规律进行进一步修正,例如可对图 5(b)、(c)进行合并。

在获得节点聚合规律的同时,度量电压幅值变化的各个影响因子可为后续的节点聚合调控的研究提供基础。

7 结语

本文在节点特性逐渐不清晰的背景下,提出了一种电网节点聚合的新理论,并重点对其基础规律进行了研究。

随着 WAMS 的发展,电网必定可实现全景过程化可观测。因此挖掘观测数据之间的关系是把握系统运行规律的基础,同时,可以摆脱电网结构参数来研究问题,而且电网结构参数的正确与否都无法考证,因为即使定期实验做出的参数,也随环境变化而变化。所以本文的研究在适应学习型电网以及智能型电网中具有一定的理论意义和实际意义。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京:中国经济出版社,2005:8-109.
- [2] 傅书遵. IEEE PES 2004 会议电网安全问题综述及防止大面积停电事故建议[J]. 电力系统自动化,2004,29(8):1-4.
FU Shutu. Summary on power system security problems on 2004 IEEE PES meeting and recommendation for developing defence measures [J]. Automation of Electric Power Systems,2004,29(8):1-4.
- [3] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架;(二)广域信息、在线量化分析和自适应优化控制[J]. 电力系统自动化,2006,30(2):1-10.
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts part II:reliable information,quantitative analyses and adaptive controls [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006,30(2):1-10.
- [4] EKNATH V,MARK O,ANDREW K. A steady-state voltage stability analysis of power systems with high penetrations of wind [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2010,25(1):433-442.
- [5] HA T L,SURYA S,THANG Q N. Augmenting wind power penetration and grid voltage stability limits using ESS application design sizing and a case study[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2012,27(1):161-171.
- [6] SANDRO C,GLAUCO N T. A real-time voltage instability identification algorithm based on local phasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2008,23(3):1271-1279.
- [7] 牟晓明,李志民. 一种计算电压稳定边界的两阶段潮流方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(3):72-76.
MOU Xiaoming,LI Zhimin. Two-stage power flow method for calculating voltage stability margin[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(3):72-76.
- [8] 李连伟,吴政球,钟浩,等. 基于节点戴维南等值的静态电压稳定裕度快速求解[J]. 中国电机工程学报,2010,30(4):79-83.

- LI Lianwei, WU Zhengqiu, ZHONG Hao, et al. Fast estimation method for steady-state voltage stability margin based on node Thevenin equivalent[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(4): 79-83.
- [9] WANG Yunfei, IRAJ R P, LI Weixing, et al. Voltage stability monitoring based on the concept of coupled single-port circuit [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2154-2163.
- [10] 刘道伟, 韩学山, 杨明, 等. 基于全参量灵敏度的电网静态稳定实用判据[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 91-100.
LIU Daowei, HAN Xueshan, YANG Ming, et al. Applied criterion of power system static stability based on comprehensive parameters sensitivity technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 91-100.
- [11] 廖其龙, 颜伟, 徐国禹, 等. 电压稳定问题中负荷节点电压幅值变化基本方程式的研究[J]. 电网技术, 2008, 32(15): 27-30.
LIAO Qilong, YAN Wei, XU Guoyu, et al. Study on basic equation of load bus voltage magnitude variation for voltage stability problem[J]. Power System Technology, 2008, 32(15): 27-30.
- [12] 赵冬梅, 陈晓云, 张旭. 基于广域测量系统的在线电压稳定预测指标的应用[J]. 电网技术, 2011, 35(7): 118-122.
ZHAO Dongmei, CHEN Xiaoyun, ZHANG Xu. Application study of on-line voltage stability prediction index based on WAMS [J]. Power System Technology, 2011, 35(7): 118-122.
- [13] 罗钢, 石东源, 陈金富. 基于参数化潮流模型的可用输电能力改进算法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4): 19-25.
LUO Gang, SHI Dongyuan, CHEN Jinfu. Improved available transmission capability algorithm based on parameterized power flow model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 19-25.
- [14] 赵晋泉, 周超, 陈刚. 节点类型扩展连续潮流及其应用[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 1-6.
ZHAO Jinquan, ZHOU Chao, CHEN Gang. The method and application of bus-type extended continuation power flow [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 1-6.
- [15] DEBBIE Q Z, ANNAKAGE U D, ATHULA D R. Online monitoring of voltage stability margin using an artificial neural network[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(3): 1566-1574.
- [16] SAMARTA D, MAGESH P, UMESH V, et al. Real-time monitoring of short-term voltage stability using PMU data[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 3702-3711.
- [17] JUNJIE T, LIU Junqi, FERDINANDA P, et al. Adaptive load shedding based on combined frequency and voltage stability assessment using synchrophasor measurements [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 2035-2047.
- [18] BEIIAGHI M, RANJBAR A M. Online voltage security assessment based on wide-area measurements [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 989-997.
- [19] 姚建国, 杨胜春, 王珂, 等. 智能电网“源-网-荷”互动运行控制概念及研究框架[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(21): 1-6.
YAO Jianguo, YANG Shengchun, WANG Ke, et al. Concept and research framework of smart grid “source-grid-load” interactive operation and control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 1-6.
- [20] 李俊雄, 黎灿兵, 曹一家, 等. 面向智能电网的互动式节能调度初探[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(8): 20-25.
LI Junxiong, LI Canbing, CAO Yijia, et al. Preliminary investigation on interactive energy-saving dispatch oriented to smart grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(8): 20-25.
- [21] JAIME D L R, VIRFILIO C, JAMES S T, et al. Synchronized phasor measurement applications in power systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(1): 20-27.
- [22] ESMAEIL I, INNOCENT K. Dynamic state estimation in power system by applying the extended Kalman filter with unknown inputs to phasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2556-2566.
- [23] 刘志文, 刘明波. 基于 Ward 等值的多区域无功优化分解协调算法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(14): 63-69.
LIU Zhiwen, LIU Mingbo. A decomposition and coordination algorithm for multi-area reactive power optimization based on Ward equivalent [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(14): 63-69.
- [24] HYUNGSEON O. Aggregation of buses for a network reduction [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 705-712.
- [25] 余娟, 张勉, 朱柳, 等. 考虑灵敏度一致性的外网静态等值新理论研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 64-70.
YU Juan, ZHANG Mian, ZHU Liu, et al. New theory on external network static equivalent based on sensitivity consistency [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 64-70.
- [26] JOE H C, ARANYA C, MURAT A, et al. Synchronized phasor data based energy function analysis of dominant power transfer paths in large power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(2): 727-734.
- [27] JOE H C, ARANYA C, LUI V, et al. Estimation of radial power system transfer path dynamic parameters using synchronized phasor data [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 564-571.
- [28] ARANYA C, JOE H C, ARMANDO S. A measurement-based framework for dynamic equivalencing of large power systems using wide-area phasor measurements [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(1): 68-81.
- [29] 汤涌, 孙华东, 易俊, 等. 基于全微分的戴维南等值参数跟踪算法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 48-53.
TANG Yong, SUN Huadong, YI Jun, et al. Tracing algorithm for Thevenin equivalent parameters based on complete differential equation [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 48-53.
- [30] 王波. 关于复数模值近似计算的探讨[J]. 西北电讯工程学院学报, 1983(2): 59-68.
WANG Bo. A discussion on approximate calculation of complex amplitude [J]. Journal of Northwest Telecommunication Engineering Institute, 1983(2): 59-68.
- [31] 高惠璇. 应用多元统计分析[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005: 308-310.

- [32] 虞欣,郑肇葆. 基于 Q 型因子分析的训练样本的选择[J]. 测绘学报,2007,36(1):67-71.
YU Xin,ZHENG Zhaobao. Selection of training samples based on Q-factor analysis[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2007,36(1):67-71.
- [33] MACQUEEN J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations [J]. Proceedings 5th Berkeley Symp Math Statist,1967(1):281-297.
- [34] 王惠文,刘强,屠永平. 偏最小二乘法回归模型内涵分析方法研究[J]. 北京航空航天大学学报,2000,26(4):473-476.
WANG Huiwen,LIU Qiang,TU Yongping. Identification of optimal subspace from PLS regression [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2000,26(4):473-476.
- [35] 殷瑞飞,朱建平. 数据挖掘中的一种新的聚类方法——基于对应分析与因子旋转[J]. 统计研究,2008,25(1):93-97.
YIN Ruifei,ZHU Jianping. A new clustering method in data mining-based on correspondence analysis and factor rotation[J]. Statistical Research,2008,25(1):93-97.

作者简介:



郝广涛

郝广涛(1980—),男,山东烟台人,博士研究生,主要研究方向为智能电网运行与控制(E-mail:haoguangtao@126.com);

韩学山(1959—),男,辽宁大连人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事电力系统分析与控制、电力市场优化调度、检修与运行决策等领域的研究与教学工作;

梁军(1956—),男,山东龙口人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统分析与控制;

贡志皓(1973—),男,山东济南人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统运行与控制;

董晓明(1980—),男,山东济南人,博士,主要研究方向为电力系统运行与控制;

张学清(1982—),男,山东烟台人,博士,主要研究方向为电力系统运行与控制。

Grid node aggregation law based on Q-factor learning in wide-area environment

HAO Guangtao¹,HAN Xueshan¹,LIANG Jun¹,YUN Zhihao¹,DONG Xiaoming²,ZHANG Xueqing³

(1. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education, Shandong University, Ji'nan 250061, China; 2. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments,

Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Jinan Municipal Electrical Power Company, Ji'nan 250012, China)

Abstract: As the grid-connection of large-scale renewable energy and the reform of deregulated electricity market make the centralized online node-voltage security analysis, dispatch and control even difficult, a regulation theory of node aggregation based on the progressive learning in the condition of panoramic process observability for power system operation is proposed, which adopts the power grid dispatch mode of "interacted local autonomy and central control". A method based on Q-factor learning is proposed to mine the law of node aggregation, which, based on the traditional node voltage equation and the equivalent models of generator and load, obtains the analytical relationship between the node voltage phasor and the electric potential in the wide-area environment, deduces the influencing factor of voltage magnitude variation during two successive measurements, and achieves the aggregation law of nodes with same direction of voltage magnitude variation through the process of Q-factor learning. The simulative analysis for Dezhou Grid verifies the correctness and effectiveness of the proposed method.

Key words: electric power systems; panoramic process observability; progressive learning; interacted local autonomy and central control; node aggregation; Q-factor; models; wide area measurement; dispatch