

含新能源电力系统状态估计研究现状和展望

赵俊博,张葛祥,黄彦全

(西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 610031)

摘要: 随着新能源的并网,需要考虑新类型电源的特性对电力系统状态估计器进行进一步研究。综述了系统拓扑结构处理、系统可观性方法;对新能源并网模型进行了详细分类和概述;按照新能源并网方式对含新能源电力系统状态估计方法进行分类和详细分析;在对传统不良数据检测和辨识研究现状进行总结的基础上,分析了新能源并网后不良数据检测与辨识所面临的困难,同时给出了可能的解决方法。最后对新能源并网建模、含新能源电力系统状态估计算法、含新能源不良数据检测与辨识中值得研究的方向进行了展望。

关键词: 电力系统; 新能源; 并网; 模型; 状态估计; 可观性分析; 不良数据辨识

中图分类号: TM 73; TM 744

文献标识码: A

DOI: 10.39691/j.issn.1006-6047.2014.05.002

0 引言

随着世界经济的发展,常规化石能源供应不足的矛盾日益突出,环境污染问题越来越严重,开发和利用新能源有助于缓解能源供应和环境问题所带来的压力。近年来,新能源发电^[1]及并网技术^[2]、分布式发电^[3-5]等逐渐成为业界研究的热点。新能源主要包括风能、生物质能、太阳能、地热能等,是可循环利用的清洁能源。国际能源署(IEA)对2000年至2030年国际电力需求进行的研究表明,在2010年至2030年中新能源发电将比其他任何燃料发电都要增长更快,年增长速度近6%,其总发电量将增加5倍,到2030年,它将提供世界总电力需求的4.4%^[4]。开发利用新能源是环境治理和生态保护的客观要求,也是满足人类社会可持续发展需要的选择。

新能源、分布式能源渗透的不断提高以及集中和分布式发电技术的不断改进为新能源发电并网提供了有效的技术支持^[6]。在我国,根据容量的不同,太阳能、风电等新能源并网形式呈现出多样化,既有通过中高压接入输电网的并网方式,也有经过低压线路接入配电网的并网方式。

新能源会在现在和将来的电力系统中扮演着越来越重要的角色,它的并网不仅能够减少电网能量损失还能减少输电线路数量,提高经济效益^[7-8],然而具有波动性和间歇性的大规模新能源发电的并网会

对电网造成较大的冲击,并引发一系列的问题,如继电保护^[9]、电网的电压和频率稳定等问题^[10],因此如何确保新能源安全有效地并网需要解决诸多问题,状态估计便是其中之一。自从Schweppe F. C.^[11]等人首次提出电力系统状态估计以来,电力系统状态估计在电网监控和控制中已成为一个重要功能。它的作用是对数据采集与监控系统(SCADA)提供的实时信息进行滤波,以提高数据精度,排除错误信息的干扰,从而得到电力系统实时状态数据库,为能量管理系统(EMS)进行各种重要的控制提供数据支持,如电网的实时建模、潮流优化、不良数据的检测与辨识和基于电力系统状态估计的可靠与安全性评估^[12-13]。状态估计问题的提出得到了国内外诸多学者的广泛关注,他们以数学、控制理论和其他新兴理论为指导,结合电力系统本身的特点,在理论上进行了大量的研究,并取得了不少成果。文献[12-18]从状态估计算法、配电网状态估计、数字信号处理技术在状态估计中的运用、多区域状态估计、微电网状态估计等方面较为系统地综述了1970年至2012年间各个时期电力系统状态估计的研究进展,但是对于含新能源的电力系统状态估计研究还比较少。随着近几年来新能源逐步成为研究热点,适用于新时期电网环境的状态估计方法再次受到重视,并取得了一些成果,这些成果对于新能源并网对电网电压水平、系统暂态稳定性、电能质量的影响的研究具有积极意义,并指导能量管理中心、配电管理中心优化调度和对电网的实时监控,从而保证系统安全、稳定和经济地运行。

受此启发,本文对近年来新能源并网模型、含新能源电力系统状态估计模型、算法和不良数据处理等方面的研究成果进行比较详尽的归纳,并提炼出与新时期状态估计紧密相关的若干数学以及研究热

收稿日期:2013-07-01;修回日期:2014-03-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61170016,61373047);教育部新世纪优秀人才支持计划研究项目(NCET-11-0715)及配套项目(SWJTU12CX008);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(SWJTU11ZT07)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(61170016,61373047),the Program for New Century Excellent Talents in University(NCET-11-0715) and SWJTU Project(SWJTU12CX008) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(SWJTU11ZT07)

点,以期推动含新能源电力系统状态估计的研究,并最终为中国的坚强智能电网建设提供智力支持。

1 新能源并网建模

状态估计作为当代电力系统中 EMS 的重要组成部分,承担着利用系统网络的实时量测数据和静态数据对网络进行实时建模、估计或预报系统的实时运行状态的重任^[14]。图 1 给出了一个 EMS 的配置情况,其中系统网络拓扑结构处理和系统可观测性分析是进行状态估计的必要条件,而随着大规模新能源并网,系统的网络拓扑结构发生了变化,配网潮流也已不再是单向流动^[18]。因此,新能源并网后系统网络拓扑结构处理、可观测性分析和新能源并网模型分析是首要任务。

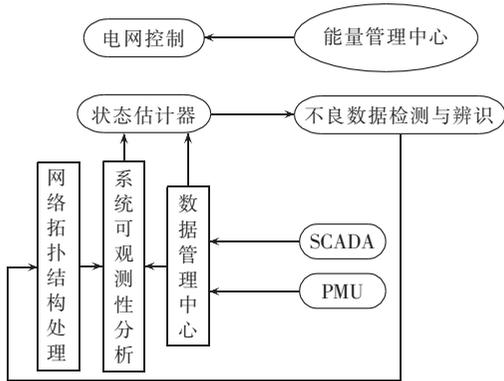


图 1 EMS 配置
Fig.1 EMS configuration

1.1 网络拓扑结构处理

电力系统的网络结构信息主要来源于电力系统元件之间的几何关联关系和电气物理耦合关系,不同的系统运行方式及网络拓扑结构表现为不同支路开断或闭合的组合,在数学表达上是一个复杂的组合问题^[19]。1847 年基尔霍夫首次将图论运用到电力网络拓扑结构分析中来,奠定了现代电力网络理论的基础^[20];在此基础上,目前拓扑分析的研究多数集中于搜索法和矩阵法 2 类,基于搜索法的拓扑分析主要有深度优先搜索^[21]、广度优先搜索^[22],而基于矩阵法的拓扑分析主要有节点关联矩阵法^[23]、邻接矩阵法等^[24]。随着新能源的并网和现代互联大电力系统的不断发展,虽然近年来计算机及网络水平得到了很大的提高,但大规模电网结构分析依然是电力系统在线、实时分析的一大难题,基于图论的电网划分方法研究、分布式拓扑结构处理在未来大电力系统中将会得到越来越多的重视;此外,实际电力系统是一个动态变化的网络,由于负荷变化、故障跳闸、新能源并网与切机等原因,电网拓扑结构常常发生变化,即便是网络拓扑结构的局部变化,也有可能导致输电线路过负荷、电压越限,过负荷设备在系统保

护作用下可能退出运行,进而发展成为大范围电网结构变化,甚至发生连锁故障问题^[25],因此优化及辨识电网薄弱拓扑,消除运行方式及电网结构变化给电力系统运行带来的安全隐患十分重要,文献[26]在考虑系统约束的情况下给出了一种拓扑结构分析方法;文献[27]运用禁忌搜索优化算法讨论了拓扑结构的优化。但是关于系统薄弱拓扑辨识的研究目前还比较少,需要进一步研究;另外关于拓扑结构优化算法的研究也值得关注。

1.2 系统可观测性分析

电力系统状态能够被估计的必要条件是系统具有可观测性,即系统的量测数量、种类、分布足够用于求解系统的当前状态^[28]。可观测性算法的好坏将直接影响状态估计算法的收敛性甚至决定状态估计能否顺利进行^[29]。

传统的系统可观测性分析主要有数值方法、拓扑方法和数值-拓扑混合方法 3 种^[14]。在数值可观测性分析中,主要是判断量测雅可比矩阵 H 是否列满秩或者增益矩阵 G 是否奇异,若 H 或 G 因式分解后对角线不出现零元素,则系统可观测;否则,系统不可观测^[28]。该方法需要进行数值计算,并且已经推广到正交变换法、Hachtel 法、克莱姆矩阵-最小范数解方法、阶梯型降维法和带等式约束的估计器中^[30-33]。拓扑可观测性分析的主要思想是能否根据量测配置建立一个满秩的最大生产树,若能找到,则系统可观测^[34]。文献[35]给出了一种数值-拓扑混合拓扑处理方法,该方法通过拓扑分析处理支路量测形成若干个潮流孤岛,潮流孤岛用超节点代替,形成降阶的网络,最后用数值分析法对降阶的网络进行处理即可。

随着相量测量单元(PMU)技术的不断发展,融合 PMU 量测数据的系统可观测分析方法受到广大学者的重视,并取得了一些研究成果。文献[36]提出一种 3 阶段优化 PMU 配置方法,相比于传统的量测配置方法,该方法能放置尽量少的 PMU 来确保系统可观测性;文献[37-39]则利用智能优化算法确定保证系统可观性的最少 PMU 配置,并对此时的系统量测冗余度进行了分析;文献[40]则同时利用传统的量测数据和 PMU 量测对系统的可观测性和量测冗余度进行了分析。

如今新能源的大规模并网势必打破以前的量测配置格局,如何更好地融合传统的量测和 PMU 量测以实时监控系统网络结构成为今后所要密切关注的问题,此外如何优化配置量测设备以达到实时监控新能源的并网状态也是值得研究的问题。

1.3 新能源并网模型

大量基于新能源的分布式电源接入,使得现有配电网放射状的供电结构以及配电网的电压调节、

潮流控制、继电保护和综合自动化方案,无法适应新的网络结构变化,因此研究高效的并网模型,以方便电网的控制、优化具有十分重要的意义。

文献[41]从新能源的规划、供需、预测和实际模型等方面综述了新能源的研究进展;文献[42]则从新能源并网的优化方面全面地综述了近几十年来新能源发展中所用的优化模型和优化方法;文献[43]综述了新能源并入各种电力系统所用到的大约 68 种计算和分析软件,并从适用范围、用途、功能等方面对各种计算和分析软件进行了详细的阐述,这对于新能源并网分析具有重要的指导意义;而文献[44]则基于风险评估理论对中国可接纳大规模风机并网的能力进行了建模,并通过实际的甘肃省可接纳风机并网案例验证了此模型的正确性,这对于我国风机的规划、并网有很重要的实际意义。

本文主要考虑新能源在状态估计中的模型。文献[45]将 DFIG 型风机视为 PV 节点,并估计了此风机在不同环境下的功率输出;文献[46]建立了基于异步发电机等值电路的风力发电机组 PQ(V)稳态模型;文献[47]采用 RX 迭代模型,将风电场作为一个以 RX 表示的阻抗接在母线上;文献[48]将常用的分布式电源归结为 PI、PV 和 PQ 模型,并在配电网潮流计算中得到了具体的运用。表 1 归纳了常用的分布式电源类型、发电机类型、并网方式和并网模型。

1.3.1 PQ 模型

该节点类型可以将其作为负的负荷来处理,电流方向为注入母线方向。PQ 节点的视在功率为:

$$S = -P \pm jQ \quad (1)$$

若分布式电源向电网输送有功和无功,电源的视在功率为 $S = -P - jQ$;若分布式电源,如感应风力发电机向电网输送有功,从电网吸收无功,分布式电源的视在功率为 $S = -P + jQ$ 。分布式电源的注入电流可以由下式求出:

$$I_{\text{inj_PQ}} = \left(\frac{S}{U} \right)^* \quad (2)$$

其中, U 为分布式电源接入节点的电压。该节点类型的量测量选取此节点的有功功率和无功功率,假设

节点号为 i ,则有:

$$\begin{cases} P_i = -P \\ Q_i = -Q \end{cases} \quad (3)$$

量测函数的表达式为:

$$\begin{aligned} P_k^p &= U_k^p \sum_{i=1}^m I_{ik}^p \cos(\delta_k^p - \alpha_{ik}^p) - U_k^p \sum_{i=m+1}^n I_{ki}^p \cos(\delta_k^p - \alpha_{ki}^p) + \\ &\quad \text{Re} \left\{ U_k^p \sum_{i=1}^m \left[- \sum_{l=A,B,C} (U_l^k + U_i^l) (jB_{ik}^{pl}/2) \right]^* \right\} \\ Q_k^p &= U_k^p \sum_{i=1}^m I_{ik}^p \sin(\delta_k^p - \alpha_{ik}^p) - U_k^p \sum_{i=m+1}^n I_{ki}^p \sin(\delta_k^p - \alpha_{ki}^p) + \\ &\quad \text{Im} \left\{ U_k^p \sum_{i=1}^m \left[- \sum_{l=A,B,C} (U_l^k + U_i^l) (jB_{ik}^{pl}/2) \right]^* \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

其中, p 表示不同的相位; P_k^p 与 Q_k^p 分别为母线 k 的 p 相注入有功和无功功率; U_k^p 与 δ_k^p 分别为母线 k 的 p 相电压幅值和相角; I_{ki}^p 为 p 相中从母线 k 到母线 i 的支路电流幅值; B_{ik}^p 和 B_{ki}^p 分别为 p 相中从母线 i 到母线 k 的支路电纳和 p 相中从母线 i 到母线 k 的支路电纳; l 为电力系统三相 A、B、C 中的一相。

该节点类型分布式电源量测初始化时与一般的负荷节点的处理没有大的区别,只是将其处理成负值即可。

1.3.2 PV 模型

在该模型下, PV 节点上增加的无功功率以及该无功功率相应的等效注入电流分别为:

$$\Delta Q^k = X^{-1} |U^k| |\Delta U^k| \quad (5)$$

$$\Delta I_{\text{inj_PV}}^k = X^{-1} |\Delta U^k| \angle (\theta + \delta_k^*) \quad (6)$$

其中, $\Delta U^k = |U^k| - U_s$, U^k 为第 k 次潮流迭代得到的接入节点的电压值, U_s 为 PV 节点的电压设定值; X 为网络阻抗矩阵中对应节点阻抗的虚部; δ_k^* 为第 k 次潮流迭代得到的接入节点的电压相角; $\theta = 90^\circ$ 。

PV 节点的注入电流为:

$$I_{\text{in_PV}}^k = I_{\text{in_PV}}^{k-1} + \Delta I_{\text{inj_PV}}^k \quad (7)$$

在计算各支路电流的过程中将该注入电流代入进行迭代。该节点类型的量测量选取此节点的有功功率和节点电压幅值:

$$\begin{cases} P_i = -P \\ U_i = U \end{cases} \quad (8)$$

P_i 的量测函数与 PQ 节点类型有功功率量测处

表 1 常用分布式电源并网模型

Tab.1 Common grid-connection models of distributed power sources

分布式电源类型	发电机类型	并网方式	并网模型
风电系统	鼠笼式异步电机	直接并网	PQ, PQ(V), RX
	交流励磁双馈发电机	整流+逆变	PQ, PV
	传统或永磁式同步发电机	整流+逆变	PQ, PV
	无刷双馈发电机	整流+逆变	PQ, PV
光伏发电系统	—	逆变	PQ, PI, PV
地热能	同步发电机	整流+逆变	PQ, PV
海洋能	四象限同步发电机	整流+逆变	PQ, PV
微型燃气轮机	永磁式同步发电机	整流+逆变或 AC/AC 变换器	PQ, PV
燃料电池	—	逆变	PQ, PV

理方法相同,而电压量测函数表达式为:

$$U_{(n+1)r}^p = U_0^p \cos \delta_0^p - \sum_{i=1}^{n+1} \sum_{q=A,B,C} \left\{ \left(I_{i-1}^q \cos \alpha_{i-1}^q + \sum_{l=A,B,C} \frac{B_{i-1,i}^{ql}}{2} U_{i-1}^l \sin \delta_{i-1}^l \right) Z_{i-1,i}^{pq} \cos \theta_{i-1,i}^{pq} - \left(I_{i-1}^q \sin \alpha_{i-1}^q - \sum_{l=A,B,C} \frac{B_{i-1,i}^{ql}}{2} U_{i-1}^l \cos \delta_{i-1}^l \right) \times Z_{i-1,i}^{pq} \sin \theta_{i-1,i}^{pq} \right\} \quad (9)$$

其中, p, q 表示不同的相位; U_0^p 和 δ_0^p 分别为根母线 p 相电压幅值和相角; $I_{i-1}^q, \alpha_{i-1}^q$ 和 $\theta_{i-1,i}^{pq}$ 分别为第 $i-1$ 条支路的 q 相电流幅值、相角和 pq 相的相角; $B_{i-1,i}^{ql}$ 和 $Z_{i-1,i}^{pq}$ 分别为相应支路的电纳和阻抗。

需要注意的是,在计算过程中,如果 PV 节点的电压幅值不等于设定的电压幅值,则需要调节 PV 节点的无功功率,例如采用向 PV 节点注入一定的电流的方法使 PV 节点的电压幅值达到预先设定的值^[49];但由于 PV 节点可调无功功率是有限的,所以需要判断在附加注入电流的情况下, PV 节点的无功功率是否发生越限,如果越限,该节点就必须转换为 PQ 节点。

1.3.3 PI 模型

在该模型下,节点相应的无功功率可由迭代得到的电压、恒定的电流增幅值和有功功率计算得到,在 k 次迭代过程中便可将 PI 节点处理成有功和无功输出分别为 P 和 Q 的 PQ 节点:

$$Q^k = \sqrt{|I|^2 |U^k|^2 - P^2} \quad (10)$$

$$I_{inj-PI}^k = \left(\frac{-P - jQ^k}{U^k} \right)^* \quad (11)$$

该类型的量测量选取此节点的有功功率和电流幅值:

$$\begin{cases} P_i = -P \\ I_{(i-1)r} = I \end{cases} \quad (12)$$

第 i 个节点的注入功率 P_i 的量测函数与 PQ 节点类型有功功率量测处理方法相同。PI 节点类型在初始化时可通过算式 $Q_i = \sqrt{|I|^2 |U^0|^2 - P_i^2}$ 计算得到第 i 个节点的注入初始无功功率, U^0 为根母线电压幅值,这样, PI 节点在初始化时便作为 PQ 节点处理,而在迭代过程中一直以 PI 节点的形式存在。

1.3.4 PQ(V)模型

异步发电机在并网运行时,一方面向电网输出有功功率,另一方面由于它本身没有励磁装置,必须靠电网提供无功功率来建立磁场,因此它没有调压能力,不能像常规同步发电机那样视为电压幅值恒定的 PV 节点^[50-51],而其吸收的无功功率的大小与转速差 s 和节点电压 U 的大小有密切的关系,因此宜采用发电机组 PQ(V)模型。

异步发电机的近似等效电路如图 2 所示, U 为发电机的节点电压幅值, I_s, I_R 和 I_m 分别为流过定子

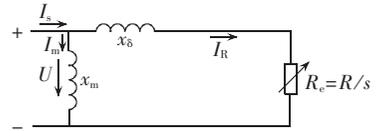


图 2 异步发电机近似等效电路

Fig.2 Approximate equivalent circuit of asynchronous generator

绕组、转子绕组和励磁绕组的电流, s 为转速差, R 为转子电阻, R_e 为机械负载等效电阻, x_m 为励磁电抗, x_s 为发电机定子电抗与转子电抗之和, P_e 为异步发电机有功功率。在有功功率一定的情况下,发电机转速差和无功功率为:

$$s = \frac{R(U^2 - \sqrt{U^4 - 4x_s P_e^2})}{2P_e x_s^2} \quad (13)$$

$$Q = P_e \frac{R^2 + x_s(x_m + x_s)s^2}{R x_m s} \quad (14)$$

从式(13)、(14)可以看出,在有功功率一定的情况下,异步发电机无功功率与电压的变化密切相关,因此在并网时作为 PQ(V)节点来处理更合理。实际上,如果对精度要求不是很高,异步发电机也可以近似等效为 PQ 模型,但风能具有随机性、间歇性等特点,该模型并不能反映风力发电的本质,而基于稳态 PQ(V)模型的 RX 模型^[47]考虑了异步发电机本身的特性,较详细地体现了异步风力发电机输出功率的特性,这对于风电并网对电力系统稳态影响的研究具有积极的意义。

基于新能源的分布式电源种类比较多,但是其并网方式只有同步发电机、异步发电机和电力电子变换器 3 种。采用同步发电机、异步发电机作为接口的分布式电源,其模型与运行方式有关;采用电力电子变换器分布式电源,其模型与控制策略有关。文献[52-53]总结了新能源并网方面相关的控制策略以及将来所要面临的挑战。因此,在选择新能源并网的方式和模型时要综合考虑接口方式、新能源类型、新能源并网对电网的影响,从而选择出最佳的并网方式。

2 含新能源电力系统状态估计

含新能源电力系统状态估计包括系统网络拓扑结构处理、系统观测性分析、新能源模型、状态估计模型、状态估计算法和不良数据处理 6 个部分,前 3 个部分已进行了比较详细的阐述,因此本节主要从状态估计模型、状态估计算法和不良数据处理 3 个方面进行概述与总结。

2.1 传统状态估计模型

一个给定网络接线、支路参数和量测配置的 n 节点系统,状态估计模型的数学模型为:

$$z = h(x) + e \quad (15)$$

其中, z 为量测向量; x 为状态变量向量; $h(\cdot)$ 为关于

状态变量的基尔霍夫定律非线性函数向量; \mathbf{e} 为服从均值为零的高斯量测噪声量测误差向量。下文将从状态变量和量测量分别进行详细说明。

2.1.1 状态变量

如图 3 所示,电力系统状态估计中,节点的电压幅值和相角常作为状态变量;电网控制或操作时变压器分接头位置变化幅度 t_{ij} 和相角偏移 φ_{ij} 也可以作为状态变量^[54-55];在支路阻抗 z_{ij} 未知或者为零时,对支路运用欧姆定律时不再有效,这时可以将有功功率和无功率潮流作为状态变量进行估计^[14];分布式电源或者新能源发电接入电网的有功和无功功率也可以作为状态估计变量,文献^[56]中对此进行了比较详细的阐述。

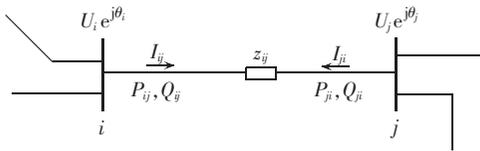


图 3 支路等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of branch

2.1.2 量测量

实际电力系统状态估计中的量测量主要包括节点电压幅值 U_i 和相角差 θ_{ij} ;支路有功和无功潮流量测 P_{ij} 、 Q_{ij} ;节点注入有功和无功量测 P_i 、 Q_i ;支路电流量测 I_{ij} 和节点注入电流 I_i ;变压器分接头位置变化幅度 t_{ij} 和相角偏移 φ_{ij} 。

2.2 含新能源电力系统状态估计模型和算法综述

表 2 根据状态估计对象、状态估计中新能源模

型和状态估计算法对含新能源的电力系统状态估计进行了分类。根据新能源在状态估计中所采用的模型将含新能源的电力系统状态估计分为 4 类:基于 PQ 注入型等式或不等式约束的电力系统状态估计、基于 PQ 注入型和因子函数的电力系统状态估计、基于 RX 等效的电力系统状态估计以及基于 PV 型节点的电力系统状态估计。下面分别从这 4 种含新能源电力系统状态估计模型和算法方面进行概述。

2.2.1 含新能源状态估计模型

a. PQ 注入型等式或不等式约束。

$$\begin{aligned} \min J(\mathbf{x}) &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m r_j^2 / \sigma_j^2 \\ \text{s.t. } g_i(\mathbf{x}) &= 0 \quad i=1, 2, \dots, N \\ c_i(\mathbf{x}) &\leq 0 \quad i=1, 2, \dots, M \end{aligned} \quad (16)$$

其中, $r_j = z_j - h_j(\mathbf{x})$; m 为量测量数目; r_j 为第 j 个状态量量测残差; σ_j^2 为第 j 个量测量的量测方差; $g_i(\mathbf{x})$ 和 $c_i(\mathbf{x})$ 分别代表电力系统运行的结构和运行约束,在此模型中也包含了 PQ 注入型等式或不等式约束。具体而言 PQ 注入型等式约束一般为:

$$\sum_{j \in \Omega_i} (P_{ij} - P_i^{\text{DG}} - P_i^{\text{PD}}) = 0 \quad (17)$$

其中, P_{ij} 为支路 $i-j$ 的有功潮流; P_i^{DG} 为节点 i 的注入新能源发电有功功率; P_i^{PD} 为节点 i 的有功功率需求; Ω_i 为节点 i 的邻接母线集合。

PQ 注入型不等式约束为:

$$\min P_i^{\text{DG}} \leq P_i^{\text{DG}} \leq \max P_i^{\text{DG}} \quad (18)$$

b. PQ 注入型等式和因子函数。

对于有 n 条支路的节点 a , 假设支路 $1, 2, \dots, m$

表 2 含新能源状态估计分类

Tab.2 Classification of state estimation including renewable energy sources

参考文献	状态估计对象		状态估计中新能源模型	状态估计算法
	区域	状态变量		
[56]	配电网	新能源功率和负载输出	PQ 注入型不等式约束	智能优化算法 PSO-NM
[57]	配电网	新能源功率输出和馈线电压	PQ 注入型等式约束	拉格朗日乘子法和假设检验
[58]	配电网	新能源功率输出	PQ 注入型等式约束	拉格朗日乘子法和几何原理检测
[59]	输电网	有功和无功潮流值	PQ 注入型等式约束	拉格朗日乘子法和假设检验
[60]	配电网	新能源功率输出和支路电流	PQ 注入型等式约束	拉格朗日乘子法
[61]	配电网	节点电压幅值和相角	PQ 注入型	置信传播算法
[62]	微电网	微电网节点电压	PQ 注入型和因子函数	并行置信传播算法
[63]	微电网	微电网节点电压	PQ 注入型和因子函数	基于概率的置信传播算法
[64]	区域电网	电网潮流	PQ 注入型和随机约束	随机约束法和同、反单调采样法
[65]	微电网	风速和风电功率年平均值	PQ 注入型等式约束	灰色预测和灵敏度分析
[66]	微电网	微电网节点电压和相角	PQ 注入型和因子函数	置信传播算法
[67]	区域电网	节点电压幅值和相角	等效 RX	加权最小二乘法
[68]	配电网	节点电压和电流幅值	PQ 注入型不等式约束	智能优化算法 HPSO
[69]	配电网	节点电压和功率损耗	PQ 注入型不等式约束	智能优化算法 ACO
[70]	配电网	谐波电压幅值和相角	PQ 注入型不等式约束	智能优化算法 HBMO
[71]	配电网	新能源功率和负载输出	PQ 注入型不等式约束	智能优化算法 BHMO
[72]	配电网	风力发电机参数	PV 型节点	智能优化算法 GA
[73]	配电网	变压器抽头、新能源功率输出	PQ 注入型不等式约束	多目标智能优化算法 FAPSO
[74]	配电网	网损、节点电压和经济代价	PQ 注入型不等式约束	多目标智能优化算法 HMHBMO
[75]	区域电网	节点电压幅值和相角	简化 RX	加权最小二乘法
[76]	区域电网	光伏有功功率输出	PV 型节点	求解 Hottel 方程和刘约旦方程

向节点 a 注入电流,支路 $m+1, \dots, n$ 从节点 a 流出电流,则由 KCL 可得到新能源的相关因子函数:

$$\sum_{i=1}^m I_{bi} + \left(\frac{S_k}{U_k} \right)^* = \sum_{i=m+1}^n I_{bi} \quad (19)$$

经线性近似之后可得:

$$S_k = \left(\sum_{i=m+1}^n \bar{I}_{bi}^* - \sum_{i=1}^m \bar{I}_{bi}^* \right) U_k + U_k \sum_{i=m+1}^n (I_{bi}^* - \bar{I}_{bi}^*) - U_k \sum_{i=1}^m (I_{bi}^* - \bar{I}_{bi}^*)$$

其中, I_{bi} 为支路 i 的电流; I_{bi}^* 为支路 i 的电流共轭; \bar{I}_{bi}^* 为状态估计前一次迭代 I_{bi}^* 的均值电流共轭; U_k 为新能源在支路 k 的电压; S_k 为新能源在支路 k 的注入复功率。

c. RX 等效及简化。

在第 1.3.4 节中已对 RX 等效及简化进行了说明,此时的状态估计模型不仅考虑新能源(主要指风电)的节点注入功率,且还把发电机的滑差作为状态量计入修正方程中,即状态变量扩展为 $[\Delta\theta \ \Delta U \ \Delta s]^T$,修正后最小二乘法状态估计^[12]的雅可比矩阵为:

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial U} & \frac{\partial P}{\partial s} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial U} & \frac{\partial Q}{\partial s} \\ \frac{\partial P_w}{\partial \theta} & \frac{\partial P_w}{\partial U} & \frac{\partial P_w}{\partial s} \\ \frac{\partial Q_w}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_w}{\partial U} & \frac{\partial Q_w}{\partial s} \end{bmatrix} \quad (20)$$

其中, P_w 和 Q_w 分别为含新能源节点处注入的有功功率和无功功率; $\partial P_w / \partial s$ 和 $\partial Q_w / \partial s$ 的维数与网络中心新能源节点的数目相同。

d. PV 型节点。

该节点类型的处理方式和常规潮流计算一致,具体的模型可参见第 1.3.2 节。

2.2.2 含新能源状态估计算法

考虑 ISI web of knowledge 数据库的信息,图 4 呈现了 40 余年来状态估计算法的研究进展,从图中可以看出,电力系统状态估计算法自 1970 年提出的 15 年间研究成果最多,纵观 40 余年,电力系统状态估计算法的研究论文总共约 690 篇,但是含新能源状

态估计算法的研究文章仅约 20 篇,占状态估计算法总量约 2.90%,因此含新能源状态估计需进一步研究。

本节将从 4 种不同的含新能源状态估计模型综述相对应的状态估计算法。

2.2.2.1 基于 PQ 注入型等式或不等式约束的电力系统状态估计

电力系统状态估计在数学上可以看作一个含等式和不等式约束的混合整数非线性优化问题,它的目标函数是为了得到使线电压、有功/无功功率、支路电流等这些量测量残差平方和达到最小的 x 值。国内外学者针对这一优化问题所采用的方法分为传统的数学优化方法和智能优化算法,而智能优化算法又大致分为 3 类:

a. 针对全局优化智能优化算法,如粒子群优化 (PSO) 算法、蚁群优化 (ACO)、遗传算法 (GA) 和蜜蜂生殖最佳化 (HBMO) 法;

b. 针对局部优化的智能优化算法 Nelder-Mead、禁忌搜索算法;

c. 混合智能优化算法,如 PSO-NM (Particle Swarm Optimization-Nelder Mead simplex search)、FAPSO (Fuzzy Adaptive Particle Swarm Optimization) 和 HM-HBMO (Hybrid Modified Honey Bee Mating Optimization)。

在使用传统数学优化方法解决含新能源电力系统状态估计问题中, Costa A S^[57] 将新能源等效为 PQ 注入型等式约束并采用拉格朗日乘子法和假设检验法成功地判断出新能源发电机的工作状态(并网或者脱网),并能比较准确地估计出新能源的实时输出功率;在此基础上,文献[58]同样将新能源等效为 PQ 注入型等式约束,但是采用拉格朗日乘子法和几何原理检测,相比于文献[57],几何原理检测方法更能准确地判断出新能源发电机的工作状态;与文献[57]相似,文献[58]采用拉格朗日乘子法和假设检验判断新能源发电机的工作状态,但是估计的状态变量变为线路的有功和无功潮流;文献[59]只是单纯地采用拉格朗日乘子法估计新能源功率输出和支路电流大小。拉格朗日乘子法虽然能解决等式或不等式约束的电力系统状态估计问题,但是和其他传统数学方法一样,当系统规模扩大、约束变多时,此优化方法并不能得到十分理想的结果,有时甚至出现不收敛情况,另外系统规模扩大所带来的计算量增大也是一大问题,而智能优化算法在处理复杂问题、获得近似解方面具有较大的优势。

在针对状态估计全局优化算法上, Niknam T 在 ACO 的基础上,根据蚁群算法的实际分布状态提出了一种新的方法来解决电力系统状态估计问题^[60],该方法可以准确估计出变压器抽头和新能源功率输

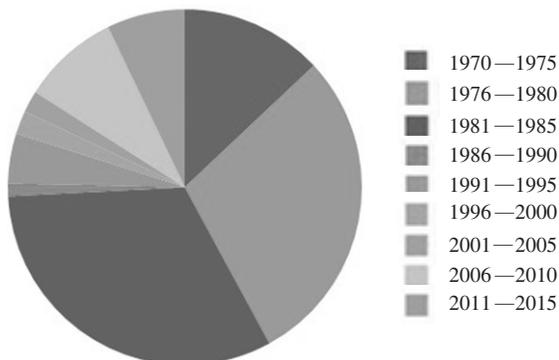


图 4 近 40 年状态估计算法

Fig.4 State estimation algorithms of recent 40 years

出并且计算速度快;文献[56]把新能源作为 PQ 注入型不等式约束,并且引入罚函数将受约束的状态估计转换成不受约束的状态估计,在此基础上运用 PSO、HBMO、ACO、GA 等全局优化算法对状态估计目标函数进行了优化求解,能比较准确地获得新能源发电有功功率输出和负载输出功率;文献[68]提出了一种基于改进粒子群优化(HPSO)的含新能源配电系统状态估计方法,该方法把新能源作为 PQ 注入型不等式约束来处理,此外该方法还考虑了配电系统实际设备的非线性特性,并且能够比较准确地估计系统中各节点的电压和电流幅值。

针对状态估计局部优化算法,Niknam T^[56]在 NelderMead 算法的基础上对系统进行状态估计,结果表明在状态变量较少的情况下,该算法的收敛性较好。关于其他局部优化算法如禁忌搜索、模拟退火算法运用于含新能源的电力系统状态估计,目前还没有学者进行尝试,因此采用局部优化算法或者其改进形式的状态估计方法还值得进一步探究。

针对状态估计混合优化算法,文献[56]将全局优化算法 PSO 与局部优化算法 Nelder-Mead 结合,提出一种新的混合优化算法 PSO-NM,并对系统进行状态估计,结果表明 PSO-NM 算法在系统量测配置不多的配电网络中能够有效地估计负载和新能源输出节点值,而且比其他单一智能优化算法估计精度高、收敛性好。文献[73]将变压器抽头变化、新能源功率输出都纳入目标函数中,采用多目标智能优化混合算法 FAPSO 估计出新能源功率输出和变压器抽头变化;文献[74]进一步将网损、节点电压和经济代价纳入目标函数,采用混合智能优化算法 HMHBMO 估计出系统的网损、电压分布和经济代价,对电网的调度和监控具有积极意义。

在状态估计中,全局优化的智能优化算法需多次迭代才能达到收敛,而且状态变量数对收敛速度影响较大。对于状态变量较少的系统,局部优化的智能优化算法收敛速度快;而对于多状态变量,全局优化算法收敛更快。混合优化算法虽然能兼顾全局优化和局部优化算法的优点,优化效果好,但是其目标函数的评价次数过多、计算速度相比单一算法慢也是一大难题。因此,在进行电力系统状态估计时,应充分考虑状态变量个数和约束条件数,从而合理选择优化算法达到提高状态估计稳定性和收敛性能的目的。另外,虽然基于优化算法的状态估计相对于传统的算法具有收敛性好、可靠性高、稳定性好等优点,但是在进行状态估计时,它的迭代次数比传统算法多,计算速度并不具有优势。

图 5 呈现了近年来各个国家将智能优化算法运用于新能源优化中的分布情况,可以看出,我国作为

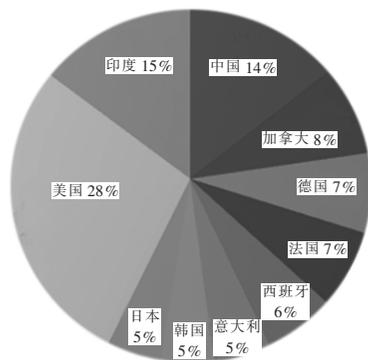


图 5 智能优化算法在新能源优化中的运用研究分布

Fig.5 Application and research distribution of intelligent optimization algorithms in renewable energy optimization

一个地域辽阔和电力系统十分庞大的国家,对于新能源优化方面的研究还需加大力度。此外,可能由于计算速度相比于传统算法并没有优势,智能优化算法在含新能源电力系统状态估计中的研究没有得到国内学者的关注,发展比较缓慢。但是,智能优化算法在状态估计中往往能获得比传统算法更好的结果,因此,将基于智能优化算法的状态估计作为离线状态估计器并有效地配合计算速度快的实时在线的状态估计器是一个很有前景的方向。

2.2.2.2 基于 PQ 注入型和因子函数的电力系统状态估计

本节主要探讨在贝叶斯网络基础上的基于 PQ 注入型和因子函数的电力系统状态估计。贝叶斯网络是一种概率网络,它是基于概率推理的图形化网络^[77],已经在计算智能和机器学习领域得到了广泛的运用^[78-79]。一个电网也可以被建模为贝叶斯网络,只要它满足本地马尔科夫特性。贝叶斯网络表达了一种分解的联合概率分布,它适合用因子图来表示。在电网建模方面,因子图不仅可以表示电网的相关性,也可以表示其他数学模型,如可再生能源的相关性和负荷预测模型。在因子图模型中通过简单地引入新的因子,状态估计可以扩展为一个静态的统计模型。

在贝叶斯网络的基础上,文献[61]将新能源等效为 PQ 注入型节点,并采用置信传播算法实时地估计出电网各个节点的电压幅值和相角,此外还利用自回归平均方法分析了风电的地域相关性和太阳能的气候关联性;文献[62]则将新能源等效为 PQ 注入节点并用因子函数进行了表达,最后采用并行置信传播算法对微电网的各个节点的电压进行了估计,此外该方法为未来智能电网量测设备中的 AMIS 和 PMUs 的优化配置奠定了一定的基础,算法的收敛性能也较好;而文献[63]在此基础上采用基于概率的置信传播算法同样对微电网的各个节点的电压等状态进行实时地监测和控制,相比于文献[62],此

方法需要系统关键位置的实时量测。

基于贝叶斯网络的含新能源电力系统状态估计的最大优点就是贝叶斯网络中的因子图不仅能够有效地表达电网中各个节点和状态变量之间的相互关系(条件概率表达关系强度),还能更好地表达新能源的环境关联性,例如风机与风速、风电场的位置相关性、太阳光发电与天气条件(晴天、多云、阴天)之间的相关性。但是以上 3 篇文献都没有更深入地对新能源的相关性对状态估计的影响作研究,因此利用贝叶斯网络的优势并采取适当的数字信号处理方法,如 Kalman 滤波^[80]、粒子滤波^[81]、自适应滤波^[82],来进一步探究新能源的相关性,并提出新的新能源预测方法,并在此基础上提出更为合适的状态估计方法;此外考虑新能源的空间关联性和用户负荷需求响应模型的状态估计方法也值得探究。

2.2.2.3 基于 RX 等效的电力系统状态估计

在第 1 节新能源的模型中已经提到,由于风力发电机一般都是异步发电机,而在对精度要求不是很高的情况下,异步发电机近似等效为 PQ 模型即可,但风能具有随机性、间歇性等特点,该模型并不能反映风力发电的本质,而基于稳态 PQ(V)模型的 RX 模型^[47]考虑了异步发电机本身的特性,较详细地体现了异步风力发电机输出功率的特性。因此针对含风电场节点的电力系统,常采用基于 RX 模型的电力系统状态估计方法。文献[67]在传统的 RX 风电模型基础上,将滑差作为状态量计入修正方程中对电力系统进行了状态估计,结果表明相比于传统的最小二乘法(WLS),其收敛性更好,精度更高。文献[75]在文献[67]的基础上将 RX 模型进行化简,同样将滑差作为状态量计入修正方程,仿真结果表明该算法比基于传统 RX 模型计算效率高,收敛性好。

RX 模型能反映风力发电的本质,但是使用该模型对含风电的系统进行状态估计需要 2 个迭代过程:常规潮流计算的迭代过程和关于异步发电机滑差的迭代过程,因此较之 PQ 模型,RX 模型在计算效率方面需要进一步提高;另外,考虑风机简化模型的动态状态估计问题也值得关注。

2.2.2.4 基于 PV 型节点的电力系统状态估计

PV 型节点是电力系统常用的节点类型,这种类型的新能源节点只需按照常规潮流计算的 PV 型节点类型来处理即可,另外 PV 型节点的新能源类型常见于光伏发电和少数风机。文献[72]中将风机等效为 PV 型节点并采用 GA 优化算法对风力发电机的参数进行了估计,而文献[76]将光伏等效为 PV 型节点,并通过求解 Hottel 方程和刘约旦方程比较准确地估计出光伏发电的输出有功功率。

2.2.3 含新能源配电网与输电网状态估计比较

从表 2 可以看出,状态估计针对的电网对象有输电网、配电网、微电网和区域电网,而微电网和区域电网也是由输电网和配电网构成,因此状态估计可以分为 2 类:输电网状态估计和配电网状态估计。由于配电网三相负荷不平衡、电流量测多和实时量测少,需要大量伪量测量以确保系统的可观性,而输电网则不存在这样的问题^[18]。因此,配电网状态估计和输电网状态估计有很大的区别,可概括为如下 4 点:

a. 在可观性方面,配电网由于线电流的存在,三相分析中相与相之间存在耦合,不能用拓扑可观性分析方法,必须用数值可观性分析方法^[14],而输电网则没有特殊要求;

b. 在模型方面,若配电网三相对称,则可以简化为只对其中的一相进行估计,其模型和输电网一致,否则,第 2.2.1 节中的模型都需要采用三相表示;

c. 在量测配置上,由于配电网中量测量很少,不能确保系统的可观性,因此系统的负荷数据、新能源发电数据常作为系统的伪量测量,而输电网中的量测冗余度较高,不需要额外的伪量测量就可以进行状态估计;

d. 在状态估计方法上,配电网状态估计的状态变量一般是电流或者新能源和负荷的输出^[56,68-74],并常采用三相状态估计(基于支路电流或者节点电压),而输电网状态估计的状态变量一般是节点电压和相角,并且输电网通常是对称的,其常用方法是加权最小二乘法。

尽管配电网状态估计和输电网状态估计有很大的区别,但它们仍有一些联系,主要表现为:在配电网解耦或者对称的情况下,广泛应用于输电网状态估计的加权最小二乘法也适用于配电网;配电网三相中每一相的状态估计都可以采用输电网中的加权最小二乘法来解决。虽然电力系统状态估计的研究已逾 40 年,但其研究主要针对于输电网,配电网状态估计的研究成果还不多。因此,作为配电网管理中心的重要功能——配电网状态估计还需要广大学者的大力研究。

2.3 不良数据处理

由于种种原因(如信道干扰导致数据失真、互感器或量测设备损坏等),电力系统的某些遥测结果可能远离其真值,遥信结果也可能有错误,这些量测量称为坏数据或不良数据。在实际的电力系统中,一般大于 $\pm(6\sim 7)\sigma$ (σ 为标准偏差)以上的量测量被认为是不良数据。电力系统不良数据的存在会降低电力系统状态估计的收敛性能,甚至造成电力系统状态估计的失败。不良数据的处理一般包含不良数据检

测和辨识这两部分。不良数据检测与辨识是电力系统状态估计的重要功能之一,其功能是在获得状态估计值的基础上依靠系统提供的多余信息,发现和排除测量采样数据中偶然出现的少数不良数据,以提高状态估计的可靠性。

2.3.1 传统不良数据检测和辨识研究现状

判断某次量测采样中是否存在不良数据的程序功能称为不良数据检测。不良数据检测方法有目标函数极值检测法、加权残差 R_w 检测法或标准化残差 R_n 检测法、测量量突变检测法等^[83-85]。

通过检测确知量测采样中存在不良数据后,确定不良数据具体测点位置的程序功能称为不良数据辨识。不良数据辨识方法主要有残差搜索法、非二次准则法、零残差法、估计辨识法等。而数据辨识方法一般是将加权残差 R_w 或者标准残差 R_n 作为特征值,利用概率论的假设检验,按照一定的置信水平确定一个门槛值,然后对量测集进行“非此即彼”的二值逻辑判断^[86]。不良数据辨识主要包括参数错误辨识^[87-88]、拓扑结构错误辨识^[89-90]和量测错误辨识^[91]。

随着新技术新理论不断发展,后来又出现了一些不良数据检测和辨识新方法,主要有基于数据挖掘的模糊数学法^[92]、聚类分析法^[93]、新息图法^[94]、基于PMU的不良数据检测与辨识^[95-98]、基于PSO、GA、免疫优化等智能优化算法和组合优化的不良数据检测与辨识^[99-102]、鲁棒性系统辨识^[103-104]。此外文献^[105-110]探究了不良数据和恶意攻击数据注入电网的状态估计和不良数据处理方法,这为未来以通信技术为基础的智能电网建设的安全防御提供了指导,但这种抵御恶意数据攻击的不良数据处理方法并不完善,还需要更深入研究。

2.3.2 新能源并网后不良数据的检测和辨识

现代电力系统呈现出规模巨大、区域互联等特点,以中国为例,中国的电网规模比世界上任何一个国家的都要大,都要复杂,而且最近几年中国的各大区域电网又以同步或者异步的方式互联,进一步加大了系统动态监测的难度,此外,中国的新能源资源丰富,分布广泛,但是地域和气候的差异为系统带来很多不确定的因素,并网容量与电力系统消纳能力的关系也需要妥善处置。此外新能源具有随机性、波动性和间歇性等特点,将给电网的运行方式带来极大的不确定性^[111],与此同时,新能源并网改变了传统电网的发、输、配单向供电模式;电能的产、供需不确定性和时空多尺度愈发明显,加之系统元件的进一步扩大,原本复杂的电网规模不断增加,系统中不良数据的出现概率大幅提高,主要表现在以下几个方面。

a. 新能源大规模并网需要大量的非线性电力电

子器件的投入,为系统带来更多的不确定噪声和信号干扰,进而造成量测设备的测量误差加大,从而出现更多的不良数据。

b. 新能源大量并网使原系统的量测配置和负荷分配也随之改变,系统的量测数据量会进一步增大,出现不良数据的概率随之而变大。

c. 新能源自身的随机性、间歇性等特点会给系统的量测带来干扰,导致不良数据的增多。

d. 新能源之间的空间或者时间关联性在某种程度上也会给系统带来不良数据;如文献^[112]中,澳大利亚5座风机之间在输出功率上的关联性影响着系统潮流分布,潮流量测量可能因此而出现一些不确定的关联性,一旦系统中有潮流量测出现较大误差,此种关联性会进一步导致更多不良数据的产生。

目前针对新能源并网后不良数据的检测和辨识的研究工作只有很少的几篇文献作过报道,而国内更是没有此方面的文章。文献^[57-59]将新能源处理为PQ注入型等式约束,并分别采用假设检验、几何原理检测对不良数据做出过一些分析,但是都没有用具体的实验进行测试,而且它的主要对象是估计新能源和电网中各节点的电压值。针对现有不良数据处理方法对新能源考虑不足,无法解决网络庞大和系统复杂带来的计算实时性差、辨识精度低等特点,可以采用基于分布式的不良数据处理方法实现对电网实时的检测。文献^[113]提出了基于完全分布式的广域大型互联电力系统不良数据处理方法来检测并剔除不良测量数据;文献^[114]提出一种基于分布式的状态估计和不良数据的检测方法,文中设计了2种分布式方法,分别计算所给网络量测的最小方差估计,而这2种分布式方法依赖于控制中心之间不同的通信方式。但是以上2种分布式不良数据处理方法并没有考虑新能源大规模接入,因此研究考虑大规模新能源并网的分布式不良数据处理方法和海量数据不良数据辨识方法是下一步要实现的目标。此外,目前存在的不良数据方法一般都是针对系统的静态断面,缺乏对于电网动态特性的实时跟踪和有效估计,满足不了智能电网运行需求,文献^[115-116]提出了系统动态不良数据处理方法,但同样没有考虑新能源接入,因此在考虑新能源大规模并网并融合卡尔曼滤波、粒子滤波等现代数字信号处理方法的系统动态状态估计和不良数据处理具有较好的前景。不良数据处理的目的是为排除给系统带来安全隐患的坏数据,确保系统安全稳定运行,这也是系统鲁棒性所要考虑的因素,文献^[117-122]提出了几种鲁棒状态估计方法,但这些方法并没有考虑新能源并网和系统的冲击,也未考虑新能源随机性、间歇性等特点对系统的鲁棒性所带来的影响,

因此,为了确保系统安全稳健地运行,计及新能源接入的鲁棒状态估计与不良数据处理方法研究显得十分重要。

3 结论和展望

状态估计是现代电力系统能量管理系统中不可或缺的重要组成部分,而新能源并网后状态估计问题仍然需要重点关注和研究。本文从新能源并网模型、含新能源电力系统状态估计模型、算法和不良数据处理等方面,结合近年来国内外发表的论文进行了比较详尽的概述,具体分析了现有方法所取得的成果与存在的不足,并分析了其中值得注意的一些难点问题。

虽然电力系统状态估计从提出到现在已 40 多年,也取得了令人瞩目的成果,但是随着大规模新能源并网,传统的电网结构发生变化、电网规模进一步加大,适应于新时代背景下的电力系统状态估计仍有许多难点问题需要深入研究,具体如下。

(1)与状态估计相关的新能源并网建模问题。

a. 在网络拓扑结构处理方面,研究能实时反映新能源并网、脱网交替运行和各元器件动态变化的动态拓扑处理方法;研究基于图论的电网划分方法、分布式拓扑结构处理方法,以应对未来日益庞大的电力系统;研究基于智能优化算法的拓扑结构处理方法,优化系统运行拓扑,保证系统运行的经济性。

b. 在系统可观测性方面,随着新能源的大规模并网,系统的量测配置发生变化,因此,研究新能源并网后使具有系统可观测性的最小量测配置方法,从而保证状态估计的顺利进行很有意义;另外,随着 PMU 在电力系统中的大量应用,如何充分利用 PMU 量测精度高、能动态反映系统实时状态信息的优势,优化 PMU 配置以保证系统的可观测和经济性也是值得研究的方向;再者,利用信息融合技术、模糊理论等将传统的 SCADA 系统量测和 PMU 量测有效结合的系统可观测性方法值得关注。

c. 在选择新能源并网方式和模型时要综合考虑分布式电源的接口方式、新能源类型、新能源并网对电网的影响,从而选择出最佳的并网方式。

(2)含新能源电力系统状态估计算法。

a. 状态估计在数学上可以看作是一个含等式或者不等式约束的优化问题,随着电网规模的不断增大,传统的经典优化算法已不能满足日益复杂的优化问题,因此智能优化算法及其改进方法运用于含新能源电力系统状态估计问题值得探索,例如局部优化算法中的禁忌搜索、模拟退火算法或者融合局部优化和全局优化的混合算法运用于状态估计优化。

b. 在含新能源电力系统状态估计的优化模型上,除了考虑需要估计的状态变量外还可以考虑系

统运行约束、结构约束(网络拓扑、零注入节点)、并网的新能源发电机的运行与维护经济代价等因素,并采用多目标优化算法对问题进行求解,例如采用多目标进化算法、Pareto 最优求解、多目标 PSO 等。

c. 在数字信号处理方法在电力系统状态估计中的运用上,可以考虑吸纳贝叶斯网络在处理新能源随机性、时空关联性等方面的优势并采取适当的数字信号处理方法,如卡尔曼滤波、粒子滤波、自适应滤波等进一步探究新能源的相关特性,在此基础上提出更为合适的状态估计方法,例如基于置信传播算法的微电网状态估计^[62]、基于贝叶斯网络的动态状态估计方法(主要采用卡尔曼滤波、粒子滤波、自适应滤波等常见的动态估计算法);此外考虑利用随机序列分析方法(AR、MA、ARMA 等)分析风电的地域相关性和太阳能的气候关联性,并在此基础上构建合适的状态估计方法也值得探究。

d. 随着电网规模不断扩大,原有的状态估计算法在计算速度和数值稳定性等方面已不能满足大系统的监控和通信要求,新的计及大规模新能源并网的分布式状态估计算法值得进一步探究;另外,作为大电网的控制中心,不仅需要掌握电网的全局运行状态,还要掌握系统的局部信息,因此,研究多区域电力系统状态估计方法可以满足以上要求,也符合未来智能电网的发展要求;在状态估计领域,文献[17]中指出未来状态估计在智能电网中的发展会朝着多级(Multilevel-局部区域级、输电网级、变电站级、配网级)发展,而其中主要考虑分层多级状态估计和分布式多级状态估计,因此含新能源的电力系统多级状态估计方法值得探索。

(3)含新能源不良数据检测与辨识。

a. 新能源大规模并网使系统不良数据增多的概率进一步提高,并且不良数据还具有一些相关性,而传统的不良数据检测与辨识方法在处理多不良数据、具有相关性的不良数据时显得不足,加之系统规模的不断增大,计算量剧增,因此,研究新型分布式抗差状态估计算法、多不良数据分布式检测与辨识方法、考虑不良数据相关性的分布式不良数据检测与辨识方法以提高抵御不良数据的能力,保障系统的安全稳定。

b. 现有的不良数据检测与辨识方法主要是考虑系统静态情况,无法满足系统实时在线剔除不良数据的要求,因此,可以考虑利用动态状态估计方法中的新息信息预先对电力系统的不良数据进行检测与辨识,如有需要可进一步结合滤波后的后验信息检测与辨识系统的不良数据;另一方面电力系统动态不良数据的检测与辨识方法虽然取得了一些成果,但是在处理具有较小幅度误差的不良数据时显得比较

困难,因此,可以考虑利用灵敏度分析方法、b-test^[116]等方法分析系统的信息和后验信息,以达到检测与辨识具有较小幅度误差的不良数据的目的;此外现有方法都没有考虑新能源大规模并网;因此研究计及大规模新能源并网并融合卡尔曼滤波、粒子滤波等现代数字信号处理方法以滤除量测中的噪声信息的鲁棒动态状态估计和不良数据处理具有较好的前景。

c. 文献[105-110]指出了电力系统恶意注入数据攻击的方法,它可以躲避传统的不良数据检测,从而达到修改状态估计结果,最终扰乱系统的运行与决策,造成较大的经济损失,但是其攻击机理研究还不够深入,与此对应的预防手段与方法还得完善;另一方面,新能源大规模的并网,相对于国家电网,黑客可以比较容易地获取一些民用或者企业的新能源发电相关的量测配置、发电量等信息,以此构建出恶意注入电网不良数据的攻击向量,因此,如何在此种情况下构建良好的不良数据检测方法显得十分重要。可以考虑的方式有:在关键位置加装保护设置^[108];对并网的新能源进行严格监控;研究新的抵御不良数据攻击注入的新方法等。

d. 与传统的不良数据辨识方法相比,一些新理论如模糊数学、数据挖掘、新息图等方法显示出对潜在问题以及规律有更高的预见性和较好的检测能力,因此前沿新理论新方法应用于含新能源的电力系统不良数据检测和辨识中也值得研究。

参考文献:

- [1] WANG X, DAI H Z, THOMAS R J. Reliability modeling of large wind farms and electric utility interface system[J]. IEEE Trans Power App Syst, 1984, 103(3): 569-575.
- [2] SINGH C, GONZALEZ L. Reliability modeling of generation systems including unconventional energy sources[J]. IEEE Trans Power App Syst, 1985, 104(5): 1049-1056.
- [3] PRASAD G D, THAKUR S S. A new approach to dynamic state estimation of power systems[J]. Electric Power Systems Research, 1998, 45(3): 386-390.
- [4] PREGELJ A, BEGOVIC M, ROHATGI A. Recloser allocation for improved reliability of DG-enhanced distribution networks[J]. IEEE Trans Power Syst, 2006, 21(3): 1442-1449.
- [5] LASSETER R H. Smart distribution: coupled microgrids [J]. Proceedings of IEEE, 2011, 99(6): 1074-1082.
- [6] ANDERSON R N. The distributed storage-generation smart electric grid of the future[J]. Pew/NCEP, 2004, 4(5): 10-50.
- [7] AKELLA A K, SAINI R P, SHARMA M P. Social economical and environmental impacts of renewable energy systems[J]. Renewable Energy, 2009, 34(2): 390-396.
- [8] GEORGILAKIS P S, KATSIANNIS Y A. Reliability and economic evaluation of small autonomous power systems containing only renewable energy sources[J]. Renewable Energy, 2009, 34(1): 65-70.
- [9] ZAYANDEHROODI H, MOHAMED A, SHAREEF H, et al. Impact of distributed generations on power system protection performance [J]. International Journal of the Physical Science, 2011, 6(16): 3873-3881.
- [10] NIKNAM T, RANJBAR A M, SHIRANI A R. Impact of distributed generation on volt/var control in distribution networks [C]//Power Tech Conference Proceedings. Bologna, Italy: IEEE, 2003: 23-26.
- [11] SCHWEPPE F C, WILDES J. Power system static state estimation—part I, II & III [J]. IEEE Trans Power App Syst, 1970, 89(1): 120-135.
- [12] WU F F. Power system state estimation: a survey [J]. International Journal of Electric Power & Energy Systems, 1990, 12(2): 80-87.
- [13] 李碧全, 薛禹胜, 顾锦汶, 等. 电力系统状态估计问题的研究现状和展望[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(11): 53-60.
LI Biquan, XUE Yusheng, GU Jinwen, et al. Status quo and prospect of power system state estimation[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(11): 53-60.
- [14] MONTICELLI A. Electric power system state estimation [J]. Proceedings of IEEE, 2000, 88(2): 262-282.
- [15] KORRES G N, HATZIARGYRIOU N D, KATSIKAS P J. State estimation in multi-microgrids [J]. Eur Trans Electr Power, 2011, 21(2): 1178-1199.
- [16] GÓMEZ-EXPÓSITO A, de la VILLAJAÉN A, GÓMEZ-QUILES C, et al. A taxonomy of multiarea state estimation methods [J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(4): 1060-1069.
- [17] GÓMEZ-EXPÓSITO A, ABUR A, de la VILLAJAÉN A, et al. A multilevel state estimation paradigm for smart grids [J]. Proceedings of IEEE, 2011, 99(6): 952-976.
- [18] YIH-FANG H, STEFAN W, JING H, et al. State estimation in electric power grids [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2012, 29(5): 33-43.
- [19] SASSON A M, EHRMANN S T, LYNCH P, et al. Automatic power system network topology determination [J]. IEEE Trans Power App Syst, 1973, PAS-92(2): 610-618.
- [20] BONDY J A, MURT U S R. Graph theory with applications [S]. London, UK: Macmillan, 1976.
- [21] SINQH H, ALVARADO F L. Network topology determination using absolute value state estimation [J]. IEEE Trans Power Syst, 2005, 10(3): 1159-1165.
- [22] ALBERT M S, STEPHEN T E, PATRICK L. Automation power system network topology determination [J]. IEEE Trans Power App Syst, 2003, 92(2): 610-618.
- [23] YEHSKUL P D, DABBAGHCHI I. A topology-based algorithm for tracking network connectivity [J]. IEEE Trans Power Syst, 1996, 10(1): 339-346.
- [24] YU D, RIGHERO M, KOCAREV L. Estimating topology of networks [J]. Phys Rev Lett, 2006, 97(18): 8701-8705.
- [25] 别朝红, 王锡凡. 复杂电力系统一类连锁反应事故可靠性评估初探 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(15): 25-28.
BIE Zhaohong, WANG Xifan. Studies on reliability evaluation of cascading faults of complicating power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(15): 25-28.
- [26] BACHER R. Network topology optimization with security constraints [J]. IEEE Trans Power Syst, 1986, 1(4): 103-111.
- [27] HIROYUKI M. Tabu search based meter placement for topological observability in power system state estimation [C]//Proceedings of the Transmission and Distribution Conference. New

- Orleans, LA, USA: IEEE, 1999: 11-16.
- [28] MONTICELLI A, WU F F. Network observability: theory [J]. *IEEE Trans Power App Syst*, 1985, 104(5): 1042-1048.
- [29] CLEMENTS K A, KRUMPHOLZ G R, DAVIS P W. Power system state estimation with measurement deficiency: an algorithm that determines the maximal observable subnetwork [J]. *IEEE Trans Power App Syst*, 1982, 101(9): 3044-3052.
- [30] MONTICELLI A, WU F F. Observability analysis for orthogonal transformation based state estimation [J]. *IEEE Trans Power Syst*, 1986, 1(1): 201-206.
- [31] NUCERA R R, BRANDWAJN V, GILLES M L. Observability analysis and bad data—analysis using augmented blocked matrices [J]. *IEEE Trans Power Syst*, 1993, 8(2): 426-433.
- [32] ALMEIDA M C D. Power system observability analysis based on gram matrix and minimum norm solution [J]. *IEEE Trans Power Syst*, 2008, 23(4): 1611-1619.
- [33] KORRES G N. Observability analysis based on echelon form of a reduced dimensional Jacobian matrix [J]. *IEEE Trans Power Syst*, 2011, 26(4): 2572-2573.
- [34] KRUMPHOLZ G R, CLEMENTS K A, DAVIS P W. Power system observability: a practical algorithm using network topology [J]. *IEEE Trans Power App Syst*, 1980, PAS-99(4): 1534-1542.
- [35] CONTAXIES G C, KORRES G N. A reduced model for power system observability analysis and restoration [J]. *IEEE Trans Power Syst*, 1988, 3(4): 1411-1417.
- [36] SAHA R B K, SINHA A K, PRADHAN A K. An optimal PMU placement technique for power system observability [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2012, 42(1): 71-77.
- [37] 程涛, 黄彦全, 申铁. 遗传算法在 PMU 优化配置中的应用 [J]. *电力系统及自动化学报*, 2009, 21(1): 48-51.
- CHENG Tao, HUANG Yanquan, SHEN Tie. Application of genetic algorithm in optimizing the configuration of PMU [J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2009, 21(1): 48-51.
- [38] CHAKRABARTI S, KYRIAKIDES E. Optimal placement of phasor measurement units for power system observability [J]. *IEEE Trans Power Syst*, 2008, 23(3): 1433-1440.
- [39] SODHI R, SRIVASTAVA S C, SINGH S N. Optimal PMU placement method for complete topological and numerical observability of power system [J]. *Electric Power Systems Research*, 2010, 80(9): 1154-1159.
- [40] LONDON J B A. Redundancy and observability analysis of conventional and PMU measurements [J]. *IEEE Trans Power Syst*, 2009, 24(3): 1629-1630.
- [41] JEBARAJ S, INIYAN S. A review of energy models [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2006, 10(4): 281-311.
- [42] BANOS R, MANZANO-AGUGLIARO F, MONTOYA F G, et al. Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(14): 1753-1766.
- [43] CONNOLLY D, LUND H, MATHIESEN B V, et al. A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems [J]. *Applied Energy*, 2010, 87(4): 1059-1082.
- [44] HE Y X, XIA T, LIU Z Y, et al. Evaluation of the capability of accepting large-scale wind power in China [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 19: 509-516.
- [45] LUND T, SORENSEN P, EEK J. Reactive power capability of a wind turbine with doubly fed induction generator [J]. *Wind Eng*, 2007, 10(4): 379-394.
- [46] WANG S X, JIANG X Y, WANG C S. Power flow analysis of distribution network containing wind power generators [J]. *Power System Technology*, 2006, 30(21): 42-45.
- [47] FEIJÓO A E, CIDRÁS J. Modeling of wind farms in the load flow analysis [J]. *IEEE Trans Power Syst*, 2000, 15(1): 110-115.
- [48] TENG J H. Modelling distributed generations in three-phase distribution load flow [J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2008, 2(3): 330-340.
- [49] LOSA I, RUSSO M. Dispersed generation modeling for object-oriented distribution load flow [J]. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2005, 20(2): 1532-1540.
- [50] KHUSHALANI S, JIGNESH M. Development of three-phase unbalance power flow using PV and PQ models for distributed generation and study of the impact of DG models [J]. *IEEE Trans Power Syst*, 2007, 22(3): 1019-1025.
- [51] LEI Y, MULLANE A, LIGHTBODY G. Modeling of the wind turbine with a doubly fed induction generator for grid integration studies [J]. *IEEE Trans on Energy Conversion*, 2006, 21(1): 257-264.
- [52] PETINRIN J O, SHAABAN M. Overcoming challenges of renewable energy on future smart grid [J]. *Journal of Telecommunications*, 2012, 10(2): 229-234.
- [53] EDUARDO C F, TARIQ S, MARIO G S, et al. Control for renewable energy and smart grids [J]. *The Impact of Control Technology*, Control Systems Society, 2011, 8(10): 69-88.
- [54] HANDSCHIN E, KLIKOSYS E. Transformer tap position estimation and bad data detection using dynamic signal modeling [J]. *IEEE Trans Power Syst*, 1995, 10(2): 810-817.
- [55] TEIXEIRA P A, BRAMMER S R, RUTZ W L. State estimation of voltage and phase-shift transformer tap settings [J]. *IEEE Trans Power Syst*, 1992, 8(3): 416-422.
- [56] NIKNAM T, FIROUZI B B. A practical algorithm for distribution state estimation including renewable energy sources [J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(11): 2309-2316.
- [57] COSTA A S, dos SANTOS M C. Real-time monitoring of distributed generation based on state estimation and hypothesis testing [C] // *Power Tech*, 2007 IEEE Lausanne. Lausanne, Switzerland: IEEE, 2007: 538-543.
- [58] SOUZA A, LOURENCO E M, SIMOES C A. Real-time monitoring of distributed generation through state estimation and geometrically-based tests [C] // *Proceedings of the Bulk Power System Dynamics and Control Conference*. Rio de Janeiro, Brazil: IEEE, 2010: 1-6.
- [59] CLEMENTS K A, SIMÕES C A, AGUDELO A. Identification of parallel flows in power networks through state estimation and hypothesis testing [J]. *International Journal on Electrical Power and Energy Systems*, 2006, 28(2): 93-101.
- [60] CARNEIRO D S M. Real-time monitoring of distributed generation in distribution systems [D]. Portuguese, Brazil: Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.
- [61] YING H, KUH A, YANG T, et al. A belief propagation based power distribution system state estimator [J]. *IEEE Computation Intelligence Magazine*, 2011, 6(3): 36-46.
- [62] HU Y, KUH A, KAVCIC A, et al. Micro-grid state estimation using belief propagation on factor graphs [C] // *Proceedings of the Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference*. [S.l.]: IEEE, 2010: 1-8.
- [63] HU Y, KUH A, KAVCIC A, et al. Real-time state estimation on micro-grids [C] // *Proceedings of the International Neural Networks*

- Conference. San Jose, CA, USA: IEEE, 2011: 1378-1385.
- [64] PAPAETHYMIU G, SCHAVEMAKER P H, van der SLUIS L, et al. Integration of stochastic generation in power systems [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2006, 28(9): 655-667.
- [65] KENNEDY S. Reliability evaluation of islanded micro-grids with stochastic distributed generation [C] // Proceedings of IEEE Power & Energy Society General Meeting. Calgary, AB, Canada: IEEE, 2009: 1-8.
- [66] ALEKSANDAR K, NARAYANA S, ILIC M. Preprint on using factor graphs for estimation, control, and security of micro-grids [C] // Proceedings of the International Neural Networks Conference. [S.l.]: IEEE, 2011: 1388-1394.
- [67] SUN Guoqiang, WEI Zhinong, PANG Bo. Power system state estimation containing wind generators [C] // Proceedings of Power and Energy Engineering Conference. Wuhan, China: IEEE, 2009: 1-6.
- [68] NAKA S, GENJI T, YURA T, et al. A hybrid particle swarm optimization for distribution state estimation [J]. IEEE Trans Power Syst, 2003, 18(1): 60-68.
- [69] NIKNAM T. A new approach for distribution state estimation based on ant colony algorithm with regard to distributed generation [J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2005, 34(15): 123-128.
- [70] AREFI A, HAGHIFAM M R, FATHI S H, et al. A novel algorithm based on honey bee mating optimization for distribution harmonic state estimation including distributed generators [C] // Proceedings of IEEE Bucharest Conference on Power Tech. Bucharest, Romania: IEEE, 2009: 1-7.
- [71] NIKNAM T. Application of honey-bee mating optimization on state estimation of a power distribution system including distributed generators [J]. Journal of Zhejiang University Science A, 2008, 9(12): 1753-1764.
- [72] BAHMANI F B, JAMSHIDPOUR E, NIKNAM T. A new method for estimation of large synchronous generator parameters by genetic algorithm [J]. Journal of World Applied Sciences, 2008, 4(3): 326-331.
- [73] NIKNAM T, BAHMANI FIROUZI B, OSTADI A. A new fuzzy adaptive particle swarm optimization for daily volt/var control in distribution networks considering distributed generators [J]. Applied Energy, 2010, 87(6): 1919-1928.
- [74] NIKNAM T, ZEINODDINI M H, DOAGOU M H. An efficient algorithm for multi-objective optimal operation management of distribution network considering fuel cell power plants [J]. Energy, 2011, 36(1): 119-132.
- [75] 庞博, 卫志农, 孙国强. 基于风力发电机简化 RX 模型的电力系统状态估计 [J]. 电网技术, 2009, 33(19): 159-163.
PANG Bo, WEI Zhinong, SUN Guoqiang. Power system state estimation based on simplified RX model of wind power generator [J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 159-163.
- [76] RAHMAN M D, YAMA S S. Novel distributed power generating system of PV-ECASS using solar energy estimation [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(2): 358-367.
- [77] SINGH M, VALTORTA M. Construction of Bayesian network structures from data: a brief survey and an efficient algorithm [J]. International Journal of Approximate Reasoning, 1995, 12(2): 111-131.
- [78] WAINWRIGHT M J, JORDAN M I. Graphical models, exponential families, and variational inference [J]. Foundations and Trends in Machine Learning, 2008, 1(1-2): 1-305.
- [79] MAJUMDAR D D. Trends in pattern recognition and machine learning [J]. Defence Science Journal, 2014, 35(3): 327-351.
- [80] GHAREMANI E, KAMWA I. Dynamic state estimation in power system by applying the extended Kalman filter with unknown inputs to phasor measurements [J]. IEEE Trans Power Syst, 2011, 26(4): 2556-2566.
- [81] SRIDHAR U. A direct sampling particle filter from approximate conditional density function supported on constrained state space [J]. Computers and Chemical Engineering, 2011, 35(6): 1110-1118.
- [82] KAR S, JOSE M F M. Real-time adaptive distributed state estimation in smart grid [C] // Proceedings of the Signal & Information Processing Association Annual Summit Conference. Hollywood, CA, USA: IEEE, 2012: 1-7.
- [83] BALDICK R, CLEMENTS K A, PINJO-DAZIGAL Z. Implementing non-quadratic objective functions for state estimation and bad data rejection [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1): 376-382.
- [84] LIU H. Hybrid detection and identification method of bad data in state estimation [J]. Electrotechnical Journal, 1999, 12(6): 17-20.
- [85] 黄彦全. 电力系统状态估计若干问题的研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2005.
HUANG Yanquan. On some subjects in power system state estimation [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005.
- [86] 黄彦全, 肖建, 李云飞. 基于量测数据相关性的电力系统不良数据检测和辨识新方法 [J]. 电网技术, 2006, 30(2): 70-74.
HUANG Yanquan, XIAO Jian, LI Yunfei. A new method to detect and identify bad data based on correlativity of measured data in power system [J]. Power System Technology, 2006, 30(2): 70-74.
- [87] LIU W, WU F, LUN S. Estimation of parameter errors from measurement residuals in state estimation [J]. IEEE Trans Power Syst, 1992, 7(1): 81-89.
- [88] LIU W E, LIM S. Parameter error identification and estimation in power system state estimation [J]. IEEE Trans Power Syst, 1995, 10(1): 200-209.
- [89] CLEMENTS K, COSTA A. Topology error identification using normalized Lagrange multipliers [J]. IEEE Trans Power Syst, 1998, 13(2): 347-353.
- [90] GÓMEZ-EXPÓSITO A, de la VILLA J A. Reduced substation models for generalized state estimation [J]. IEEE Trans Power Syst, 2001, 16(4): 839-846.
- [91] CARO E, CONEJO A J, ABUR A. Breaker status identification [J]. IEEE Trans Power Syst, 2010, 25(2): 694-702.
- [92] 刘浩. 基于模糊数学的电力系统状态估计的混合不良数据检测 [J]. 电力系统自动化, 1996, 20(3): 50-57.
LIU Hao. The application of fuzzy mathematics at bad data detection and identification of state estimation [J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(3): 50-57.
- [93] 葛成. 基于 GSA 的电力系统不良数据辨识方法研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2005.
GE Cheng. Bad data identification method for power system based on GAS research [D]. Nanjing: Nanjing University of Technology and Engineering, 2005.
- [94] 周苏荃, 柳焯. 新息图法拓扑错误辨识 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(4): 23-27.
ZHOU Suquan, LIU Zhuo. An innovation graph approach to topology error identification [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(4): 23-27.
- [95] ZHANG L X. Strategic placement of phasor measurements for parameter error identification [J]. IEEE Trans Power Syst, 2013, 28(1): 393-400.
- [96] CHEN J, ABUR A. Improved bad data processing via strategic placement of PMUs [C] // Proceedings of the IEEE Power Engi-

- neering Society General Meeting. [S.I.]:IEEE,2005:509-513.
- [97] KORRES G N,MANOUSAKIS N M. State estimation and bad data processing for systems including PMU and SCADA measurements[J]. Electric Power Systems Research,2011,81(7):1514-1524.
- [98] ZHU J,ABUR A. Improvements in network parameter error identification via synchronized phasors[J]. IEEE Trans Power Syst,2010,25(1):44-50.
- [99] KHANRAM J,DAMRONGKULKAMJORN P. Multiple bad data identification in power system state estimation using particle swarm optimization[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Electrical Engineering/Electronics,Computer,Telecommunications and Information Technology. Pattaya, Chonburi, Thailand:IEEE,2009:2-5.
- [100] LEO F B,PEREIRA R A F,MANTOVANI J R S. Fault section estimation in electric power systems using an optimization immune algorithm[J]. Electric Power Systems Research,2010,80(11):1341-1352.
- [101] MONTICELLI A,WU F F,ANDMULTIPLE M Y. Bad data identification for state estimation by combinatorial optimization[J]. IEEE Trans on Power Delivery,1986,1(3):361-369.
- [102] GASTONI S,GRANELLI G P,MONTAGNA M. Multiple bad data processing by genetic algorithms[C]//Proceedings of the IEEE Power Tech Conference. [S.I.]:IEEE,2003:1-6.
- [103] SHUBHENDU B,RUSHIKESH K,HUYEN T,et al. Robust identification based state derivative estimation for nonlinear systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control,2013,58(1):187-192.
- [104] TORNIL-SIN S,CARLOS O M,VICENC P,et al. Robust fault detection of non-linear systems using set-membership state estimation based on constraint satisfaction[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence,2012,25(1):1-10.
- [105] LIU Y,NING P,REITER M K. False data injection attacks against state estimation in electric power grids[J]. ACM Transactions on Information and System Security,2011,14(1):1-12.
- [106] BOBBA R B,ROGERS K M,WANG Q,et al. Detecting false data injection attacks on DC state estimation[C]//Proceedings of the First Workshop on Secure Control Systems. [S.I.]:IEEE,2010:1-9.
- [107] LIU Y,NING P,REITER M K. False data injection attacks against state estimation in electric power grids[J]. ACM Transactions on Information and System Security,2011,14(1):13-48.
- [108] KOSUT O,JIA L,THOMAS R J,et al. Limiting false data attacks on power system state estimation[C]//Proceedings of Conference on Information Sciences and Systems. Princeton, NJ, USA:IEEE,2010:1-6.
- [109] KOSUT O,JIA L,THOMAS R J,et al. Malicious data attacks on smart grid state estimation:attack strategies and countermeasures[C]//Proceedings of the IEEE Smart Grid Communication. Gaithersburg, MD, USA:IEEE,2010:220-225.
- [110] KOSUT O,JIA L,THOMAS R J,et al. On malicious data attacks on power system state estimation[C]//Proceedings of the 45th International Universities'Power Engineering Conference. Cardiff, WALES, UK:IEEE,2010:1-6.
- [111] VADARI S V. Investigating smart grid solutions to integrate renewable sources of energy into electric transmission grid[C]//Proceedings of the International Conference on UHV transmission. [S.I.]:IEEE,2009:1-5.
- [112] WARD K,KOROLKIEWICZ M,BOLAND J. Correlative coherence modelling of South Australian wind farms [J]. Renewable Energy,2013,1(52):154-159.
- [113] DAE-HYUN C,LE X. Fully distributed bad data processing for wide area state estimation[C]//Proceedings of IEEE International Conference. Brussels, Belgium:IEEE,2011:546-551.
- [114] PASQUALETTI F,CARLI R,BULLO F. A distributed method for state estimation and false data detection[C]//Proceedings of IEEE International Conference on power networks in Smart Grid Communications. Brussels, Belgium:IEEE,2011:469-474.
- [115] SILVA A,FILHO M,CAUTERA J. An efficient dynamic state estimation algorithm including bad data processing[J]. IEEE Trans Power Syst,1987,2(4):1050-1058.
- [116] NISHIYA K,HASEGAWA J,KOIKA T. Dynamic state estimation including anomaly detection and identification for power systems[J]. IEE Proceedings of Generation,Transmission and Distribution,1982,129(5):192-198.
- [117] HUANG S J,SHIH K R. Dynamic-state-estimation scheme including nonlinear measurement function considerations[J]. IEE Proceedings of Generation,Transmission and Distribution,2002,149(6):673-678.
- [118] SHIH K R,HUANG S J. Application of a robust algorithm for dynamic state estimation of a power system[J]. IEEE Trans on Power Systems,2002,17(1):141-147.
- [119] DURGAPRASAD G,THAKUR S S. Robust dynamic state estimation of power systems based on M-estimation and realistic modeling of system dynamics[J]. IEEE Trans on Power Systems,1998,13(4):1331-1336.
- [120] 刘辉乐,刘天琪. 电力系统动态状态估计的研究现状和展望[J]. 电力自动化设备,2004,24(12):73-77.
- LIU Huile,LIU Tianqi. Status quo and prospect of power system dynamic state estimation[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(12):73-77.
- [121] 李虹,赵书强. 基于 WAMS/SCADA 混合量测的电力系统强跟踪滤波动态状态估计[J]. 电力自动化设备,2012,32(9):101-105.
- LI Hong,ZHAO Shuqiang. Power system dynamic state estimation of strong tracking filter based on hybrid WAMS/SCADA measurements[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(9):101-105.
- [122] 牛胜锁,梁志瑞,张建华,等. 基于广义岭估计的电力系统谐波状态估计[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):94-98.
- NIU Shengsuo,LIANG Zhirui,ZHANG Jianhua,et al. Power system harmonic state estimation based on generalized ridge estimation[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(7):94-98.

作者简介:



赵俊博

赵俊博(1989-),男,四川眉山人,博士研究生,主要研究方向为含新能源电力系统状态估计、电力系统运行分析(E-mail:junbozhao55589@gmail.com);

张葛祥(1974-),男,四川绵阳人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为智能电网、电气信息与控制、现代信号处理、模式识别(E-mail:zhgxlyan@126.com);

黄彦全(1961-),男,广西宾阳人,教授,博士,研究方向为电力系统分析与控制、电力系统状态估计、变电站综合自动化技术(E-mail:yqh_by@sina.com)。

(下转第 34 页 continued on page 34)

- power systems considering restructuring and renewable generators [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2012, 27(1): 243-250.
- [23] 吴俊, 李国杰, 孙元章. 基于随机规划的并网风电场最大注入功率计算[J]. 电网技术, 2007, 31(14): 15-19.
WU Jun, LI Guojie, SUN Yuanzhang. Maximum injection power calculation of wind farms connected to power systems based on stochastic programming[J]. Power System Technology, 2007, 31(14): 15-19.
- [24] 宋晓通, 谭震宇. 改进的重要抽样法在电力系统可靠性评估中的应用[J]. 电网技术, 2005, 29(13): 56-64.
SONG Xiaotong, TAN Zhenyu. Application of improved importance sampling method in power system reliability evaluation [J]. Power System Technology, 2005, 29(13): 56-64.
- [25] YAN Ping, SEKAR A. Study of linear models in steady state analysis of power systems[C]//Proceedings of the 33rd South-

eastern Symposium on System Theory, 2001. Athens, OH, Greece: [s.n.], 2001: 127-131.

作者简介:



彭寒梅

彭寒梅(1979-), 女, 湖南衡阳人, 副教授, 博士研究生, 研究方向为配电系统可靠性分析与规划、分布式发电 (E-mail: penghanmei8@163.com);

曹一家(1969-), 男, 湖南益阳人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 研究方向为电力系统稳定与控制、信息技术在电力系统中的应用;

黄小庆(1981-), 女, 湖南湘阴人, 讲师, 博士, 研究方向为电力系统可靠性分析、电力系统脆弱性评估。

Probabilistic load flow calculation based on combination sampling for power system containing distributed generations

PENG Hanmei, CAO Yijia, HUANG Xiaoqing, LUO Cong

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Since there are multiple random variables in the probabilistic power flow calculation of power system containing distributed generations, a Monte Carlo simulation method based on combination sampling is proposed, which applies different sampling methods according to the different characteristics of random factors and considers the influence of random line fault. A probability distribution model is built with the random factors as random variables. In order to reduce the variance and improve the calculation efficiency, Latin hypercube sampling is adopted for loads and distributed generation outputs, which have continuous probability distribution, while the improved importance sampling method combined with Latin hypercube sampling is adopted for random power source and lines faults, which have discrete probability distribution. The sampling models are established for system random variables. IEEE 14-bus system and IEEE 57-bus system containing distributed generations are analyzed and results show that the proposed method is effective and has good convergency.

Key words: probabilistic load flow; distributed power generation; combination sampling; Latin hypercube sampling; importance sampling; models

(上接第 20 页 continued from page 20)

Status and prospect of state estimation for power system containing renewable energy

ZHAO Junbo, ZHANG Gexiang, HUANG Yanquan

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: As the renewable energy sources are integrated into power system, their characteristics should be considered in the further research of power system state estimator. The processing of system topology and the methods of system observability are reviewed. The grid-connection models of renewable energy sources are classified and introduced while the state estimation methods of power system containing renewable energy sources are classified and introduced according to the grid-connection modes of renewable energy sources. The research status of traditional bad data identification is summarized, based on which, the problems existing in the bad data identification of power system containing renewable energy sources are analyzed and the possible solutions are proposed. The research directions concerning the modeling of power system containing renewable energy sources, its state estimation algorithms and its bad data identification are prospected.

Key words: electric power systems; renewable energy; grid-connection; models; state estimation; observability analysis; bad data identification