

双馈风电机群并网系统时变最优潮流的优化追踪方法

李璐璐, 韩学山, 朱星旭, 李克强

(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)

摘要:针对风力发电功率不确定性引起的风电系统并网点及内部节点的电压协调控制在优化速度上难以追踪的问题,建立了双馈风电机群并网系统时变最优潮流的优化追踪模型,并给出了模型的在线快速求解方法。在实时量测、通信技术使风电系统可观测的前提下,该模型和求解方法着眼于极短优化周期内风电系统状态量变化微小的特点,通过保留泰勒展开一阶项使模型线性化,得到时变的线性优化模型,实现模型的毫秒级求解,从而实时追求风电系统的最优潮流状态。该方法利用双馈感应发电机有功、无功功率间时变的调节范围,协调各机组的有功、无功功率输出,以挖掘双馈风电机群电力电子化技术下的快速调控潜力。对某实际双馈风电机群并网系统进行算例分析,分析结果表明该方法能够有效缓解并网点和内部节点的电压问题,实现风电系统的时变最优潮流追踪。

关键词:双馈感应发电机;风电系统; P - Q 调节范围;时变最优潮流追踪;电压调节

中图分类号:TM 732;TM 614

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202101003

0 引言

对于含有大量风电机群的风电系统而言,其友好并网运行是复杂的,原因在于:风电系统拓扑结构不对称使各台风电机组汇集到并网母线的电气距离(阻抗)存在差异;各机组所处位置风速不同,运行工况存在差异;风电系统内变压器较多(每台机组均配备箱式变压器)、集电线路 R/X 比值较大且线路长度不可忽略以及有功功率的波动和无功功率的不合理分布均将引起一定的电压问题;风力发电功率具有极强的不确定性,随之引起电压波动性较强。因此风电系统并网点(PCC)和内部节点(特别是机组机端节点)均将出现不同程度的电压问题。实际运行数据表明,风电系统的PCC与位于风电系统末梢的机组机端节点的电压差可能达到5%。因此对于风电系统管理者而言,应同时关注风电系统内部节点和PCC处的电压水平。若将风电机群视为一个系统,机群并网运行过程中风能转换为电功率的追踪控制过程的关键在于电压控制,这要求所有风电机群依据其运行工况和风电系统的复杂结构进行有机地协调合作。因此,在关注PCC的同时,以系统理念研究风电机群的电压问题,对风电系统的安全经济运行有重要意义。

广泛应用于风电系统的双馈感应发电机(DFIG),通过变流器的快速调制,具有灵活的有功功率、无功功率的调节能力^[1]。在一定的电压水平下,DFIG存在一个有功功率和无功功率相互牵制的

调节范围^[2](P - Q 调节范围):当有功功率输出未达到额定功率时,机组具有相对应的无功功率调节能力;当有功功率达到最大限值时,也可通过控制桨距角、转子侧变流器等降低有功功率输出,获取额外的无功功率调节能力^[3],这在极端情况下,能够对风电系统的内部电压调控起到关键作用^[4]。

综合上述背景,对于双馈风电机群并网风电系统而言,要解决风力发电功率不确定性引起的PCC及其内部节点电压问题,需要做到以下2点:①从最优潮流的角度,合理利用分散于风电系统各处机组的有功、无功功率调节能力;②决策各台机组功率设定的时间尺度应尽量小(在控制器响应速度的可接受范围内),尽可能与风力发电功率波动的速度相适应。总体而言,就是要对风电系统的最优潮流状态进行在线、时变地追踪,或称在线优化潮流、在线调度追踪,这也是时变最优潮流追踪的概念^[5]。而随着量测、传感、通信和互联网技术的发展,风电系统各处的潮流状态实时可知,再加上电力电子化技术在风电系统中的成熟应用,使得上述时变的风电系统最优潮流优化追踪的实现成为可能。

在已往的研究中,许多文献注重DFIG与变压器、电容器等补偿设备的长时间尺度的协调优化决策^[6-8],长时间尺度下的决策对变压器分接头等设备而言是合理的。但为使DFIG快速的无功功率调节能力得到有效发挥,尚可进一步缩短对机组设定点决策的时间尺度。为应对风力发电功率的不确定性,文献[9-13]利用电压灵敏度系数对DFIG功率设定点进行快速、在线决策:文献[9-11]着眼于对风电系统层面各台机组的无功功率设定点进行快速在线调整;文献[12-13]则着重解决配电网中分散式风电的电压问题,但上述文献未从系统优化潮流的角度

收稿日期:2020-07-21;修回日期:2020-11-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51477091)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51477091)

出发对各机组进行有机联合的协调控制。

上述研究对缓解风电系统并网过程中的电压问题起到了有益的作用,而在风功率不确定性的背景下,为实现风电系统有功功率的平稳并网,需要做到在线、时变的最优潮流追踪,即各台 DFIG 均实时运行于风电系统最优潮流状态下的有功功率、无功功率设定点之上。这一概念在光伏逆变器追踪问题中已有涉及,如文献[14]提出的光伏逆变器快速追踪的最优潮流算法,利用实时量测信息时变、在线地决策光伏逆变器的控制基点。将这一想法应用于风电系统调控与运行中是本文研究的核心。

综上,针对双馈风电机组并网系统的电压控制问题,以双馈风电机组并网最大有功功率为目标,在满足 PCC 及风电机组系统内部各点电压水平约束的前提下,建立时变最优潮流追踪的非线性优化模型。以具备在线量测、通信条件为前提,利用在线量测的系统潮流状态,将该模型演变为时变的线性优化模型,进而完成毫秒级求解,对各台 DFIG 有功功率和无功功率设定点进行快速在线决策,从而实现双馈风电机组最优潮流状态的时变追踪。

1 问题的数学描述

本文研究双馈风电机组并网系统在线时变最优潮流的优化追踪问题,即对分布在系统各台 DFIG 的有功、无功功率设定点进行在线的协调调整,解决集中式补偿无法有效处理机群内部电压的问题,挖掘机群自身的无功电压调节潜力。研究重点在于量测通信条件具备的前提下,对电力电子驱使下的双馈风电机组在线时变优化调控潜力进行挖掘,因此暂未考虑无功补偿设备和变压器分接头的调整。

1.1 目标函数

在满足电压水平要求的前提下,目标是追求双馈风电机组整体输出的有功功率最大化,间接追求最小化电功率损耗,如式(1)所示。

$$\max P_{\text{PCC}}^t = \sum_{i \in N_G} P_{\text{Wi}}^t - P_{\text{loss}}^t \quad (1)$$

其中,上标 t 为当前决策时段; P_{PCC}^t 为时段 t 双馈风电机组 PCC 处的有功功率输出; P_{Wi}^t 为时段 t 节点 i 处 DFIG 机端的有功功率输出; P_{loss}^t 为时段 t 风电系统的有功功率损耗; N_G 为 DFIG 集合,也表示风电系统中 DFIG 机端所对应的节点集合。

1.2 约束条件

1.2.1 潮流平衡方程

$$(U_i^t)^2 - (U_j^t)^2 = 2(r_{ij}P_{ij}^t + x_{ij}Q_{ij}^t) - z_{ij}^2(I_{ij}^t)^2 \quad (2)$$

$$P_{ij}^t = \sum_{k \in A} P_{jk}^t + r_{ij}(I_{ij}^t)^2 - P_{\text{Wj}}^t \quad j \in N \quad (3)$$

$$Q_{ij}^t = \sum_{k \in A} Q_{jk}^t + x_{ij}(I_{ij}^t)^2 - Q_{\text{Wj}}^t \quad j \in N \quad (4)$$

$$(I_{ij}^t)^2 (U_i^t)^2 = (P_{ij}^t)^2 + (Q_{ij}^t)^2 \quad (5)$$

其中, N 为机群内所有节点集合; U_i^t, U_j^t 分别为时段 t 节点 i, j 的电压幅值; r_{ij}, x_{ij} 分别为支路 ij 的电阻、电抗, $z_{ij}^2 = r_{ij}^2 + x_{ij}^2$; P_{ij}^t, Q_{ij}^t 分别为时段 t 支路 ij 的送端有功、无功功率; I_{ij}^t 为时段 t 支路 ij 送端电流幅值; A 为以节点 j 为始端节点的所有支路末端节点 k 的集合; $P_{\text{Wj}}^t, Q_{\text{Wj}}^t$ 分别为节点 j 处 DFIG 注入的有功、无功功率,当 $j \notin N_G$ 时,与机组相连的升压变压器高压侧节点以及联络节点上注入的有功、无功功率均为 0。

1.2.2 节点电压允许变化范围

$$\underline{U}_i \leq U_i^t \leq \bar{U}_i \quad i \in N \quad (6)$$

其中, $\bar{U}_i, \underline{U}_i$ 分别为节点 i 允许电压变化的上、下限。

1.2.3 DFIG 的 P - Q 调节范围

$$0 \leq P_{\text{Wi}}^t \leq P_{\text{Wmax},i}^t \quad i \in N_G \quad (7)$$

$$Q_{\text{Wmin},i}^t \leq Q_{\text{Wi}}^t \leq Q_{\text{Wmax},i}^t \quad i \in N_G \quad (8)$$

$$Q_{\text{Wmax},i}^t = -1.5(U_i^t)^2/X_s + \sqrt{(1.5X_m U_i^t I_{\text{rmax}}^t/X_s)^2 - (P_{\text{Wi}}^t/\omega_{r,i}^t)^2} + \sqrt{S_{\text{cmax}}^2 - [(1 - \omega_{r,i}^t) P_{\text{Wi}}^t/\omega_{r,i}^t]^2} \quad (9)$$

$$Q_{\text{Wmin},i}^t = -\sqrt{(1.5U_i^t I_{\text{smax}}^t)^2 - (P_{\text{Wi}}^t/\omega_{r,i}^t)^2} - \sqrt{S_{\text{cmax}}^2 - [(1 - \omega_{r,i}^t) P_{\text{Wi}}^t/\omega_{r,i}^t]^2} \quad (10)$$

其中, $P_{\text{Wmax},i}^t$ 为时段 t 机组 i 能够输出的最大有功功率,忽略机组内部有功损耗,可由时段 t 风速 v_{Wi}^t 按风机的最大风电功率追踪原理计算得到; $Q_{\text{Wmax},i}^t, Q_{\text{Wmin},i}^t$ 分别为时段 t 内机组 i 在有功功率 P_{Wi}^t 牵制下的无功功率上、下限; $I_{\text{smax}}, I_{\text{rmax}}$ 分别为定子、转子绕组单相最大允许热电流; $\omega_{r,i}^t$ 为机组 i 转速,在后面的计算中将由量测值代替; S_{cmax} 为网侧变流器的最大允许视在容量; X_s, X_m 分别为定子电抗、励磁电抗。

式(7)和式(8)是模型的核心所在。这 2 个约束方程代表 DFIG 有功、无功功率相互牵制的允许运行范围,有功、无功功率之间呈现此消彼长的牵制关系,其推导过程见附录 A。在高风速下,DFIG 的有功功率接近满发,此时机组的无功功率调节范围很小,当电压越限时,DFIG 几乎没有能力调节电压;而利用该 P - Q 调节范围,通过降低机组的有功功率输出,可增大无功功率调节范围,进而解决电压越限问题。许多文献在计算该范围时,仅关注有功、无功功率间的牵制,忽略机组的转速、机端电压变化对该范围的影响。不同决策时段下的机组转速与机端电压显然不同, P - Q 调节范围也将随之变化,具有时变性,且变化量应当充分考虑不可忽略,具体解决措施见 2.1 节。

综上,由式(1)~(10)构成的优化模型即为双馈风电机组并网系统时变最优潮流优化追踪的数学模

型。在满足保证风电系统PCC及其内部节点电压水平的前提下(特别是机组机端电压水平),通过对各台DFIG有功功率和无功功率输出进行时变决策,即可追踪时段 t 风电系统的最优潮流状态。

但上述模型中潮流方程和DFIG的 P - Q 调节范围均为非线性约束,因此本节模型属于非线性的数学优化问题,直接求解是复杂的,求解速度难以达到风电系统在线时变决策的目的。

2 问题快速求解的解决方法

为减小风电功率波动对风电系统PCC和内部节点电压水平变化的影响程度,双馈风电机组各机组输出的有功功率和无功功率设定点需要尽可能在秒级时间内做出决策。而在电力电子化控制器的调制频率(工频50 Hz)下,DFIG具有快速、灵活的有功及无功功率响应能力。同时风电系统内的量测和通信设备比较完备,各机组的风速、功率、机端电压等运行状态、各节点电压幅值及各条集电线路的有功功率、无功功率均能通过量测得到。由风电系统潮流状态的实时量测结果可知,在极短优化周期内量测值接近潮流最优解,这将极大简化优化潮流问题的求解,是快速线性化决策实现的有利条件。

在第1节的模型中,若当前决策时段 t 的时间尺度极短,因惯性的存在,可认为时段 t 内决策前后风电系统风速、潮流、DFIG运行工况等状态量变化量较小。则在时段 t 的初始时刻,风电系统各状态量可量测的基础上,可以利用实时、在线的潮流量测信息,将潮流方程等非线性约束线性化,以实现模型的快速时变求解。

利用风电系统内丰富的在线量测信息,并基于极短优化周期内,风电系统状态量变化微小的特点,本节通过泰勒展开和线性拟合将第1节中的非线性优化模型转化为序列形式的线性优化模型,从而实现问题的快速求解,满足双馈风电机组在线时变的最优潮流追踪决策要求。

2.1 模型的线性化处理

2.1.1 潮流方程线性化处理

式(2)—(5)所示的潮流约束中非线性项为:

$$(I_{ij}^t)^2 = \left[(P_{ij}^t)^2 + (Q_{ij}^t)^2 \right] / (U_i^t)^2 \quad (11)$$

假设通过量测可得时段 t 决策前(即时段 t 初始时刻)任意支路的送端功率 $(P_{ij,0}^t, Q_{ij,0}^t)$ 以及相应节点的电压幅值 $U_{i,0}^t$ 。令 $V_i^t = (U_i^t)^2$, $V_{i,0}^t = (U_{i,0}^t)^2$,在 $(P_{ij,0}^t, Q_{ij,0}^t, U_{i,0}^t)$ 处将潮流方程进行泰勒展开,并忽略其二阶及高阶项,经推导可得:

$$(I_{ij}^t)^2 \approx \frac{2P_{ij,0}^t}{V_{i,0}^t} P_{ij}^t + \frac{2Q_{ij,0}^t}{V_{i,0}^t} Q_{ij}^t - \frac{(P_{ij,0}^t)^2 + (Q_{ij,0}^t)^2}{(V_{i,0}^t)^2} V_i^t \quad (12)$$

由式(12)可知,非线性项 $(I_{ij}^t)^2$ 转化为随 P_{ij}^t 、 Q_{ij}^t 、 V_i^t 变化的线性项,将式(12)代入式(2)—(4),可得:

$$V_j^t = \left[1 - \frac{z_{ij}^2 (S_{ij,0}^t)^2}{(V_{i,0}^t)^2} \right] V_i^t + 2 \left(\frac{z_{ij}^2 P_{ij,0}^t}{V_{i,0}^t} - r_{ij} \right) P_{ij}^t + 2 \left(\frac{z_{ij}^2 Q_{ij,0}^t}{V_{i,0}^t} - x_{ij} \right) Q_{ij}^t \quad (13)$$

$$\left(1 - \frac{2r_{ij} P_{ij,0}^t}{V_{i,0}^t} \right) P_{ij}^t = \sum_{k \in A} P_{jk}^t + \frac{2r_{ij} Q_{ij,0}^t}{V_{i,0}^t} Q_{ij}^t - \frac{r_{ij} (S_{ij,0}^t)^2}{(V_{i,0}^t)^2} V_i^t - P_{wj}^t \quad (14)$$

$$\left(1 - \frac{2x_{ij} Q_{ij,0}^t}{V_{i,0}^t} \right) Q_{ij}^t = \sum_{k \in A} Q_{jk}^t + \frac{2x_{ij} P_{ij,0}^t}{V_{i,0}^t} P_{ij}^t - \frac{x_{ij} (S_{ij,0}^t)^2}{(V_{i,0}^t)^2} V_i^t - Q_{wj}^t \quad (15)$$

其中, $(S_{ij,0}^t)^2 = (P_{ij,0}^t)^2 + (Q_{ij,0}^t)^2$ 。由式(13)—(15)可知,模型中的潮流约束被转化为以 P_{ij}^t 、 Q_{ij}^t 、 V_i^t 、 P_{wj}^t 与 Q_{wj}^t 为变量的线性表示形式,由此潮流方程得以线性化。需要说明的是,本节利用时段 t 初始时刻的量测信息作为已知输入量,对潮流方程进行线性化,是基于优化决策周期短、潮流状态变化微小的特性,同时忽略了量测误差。

2.1.2 P - Q 调节范围线性化处理

由于以式(7)和式(8)表示的 P - Q 调节范围包含转速 $\omega_{r,i}^t$ 、机端电压 U_i^t 、 P 和 Q 这4个变量,若不进行处理直接计算,求解难度较大。

式(7)和式(8)所示的 P - Q 调节范围实际上是由定子、转子电流限制值所形成的2条椭圆曲线和网侧变流器的无功调节能力以及DFIG最大有功出力 $P_{w,max}$ 共同决定的。进行线性化前、后DFIG的 P - Q 调节范围如附录A图A2所示。由图可知,进行线性化之前,当转速和机端电压一定时,DFIG输出的有功、无功功率关系(即 P - Q 调节范围)近似为半个椭圆的二维凸集,如图A2(a)阴影部分所示。下面通过线性拟合对 P - Q 调节范围进行分段线性化处理。

转速、机端电压对 P - Q 调节范围的具体影响如下:由于转速位于式(9)、(10)中 $P_{wi}^t/\omega_{r,i}^t$ 的分母位置,当转速增大或减小时,在不考虑式(7)(即不考虑机组最大有功功率限制)时,会引起图A2(a)所示阴影部分面积在 P 轴方向上的拉长或缩短(近似的椭圆的长轴顶点会随之右左移动),从而将在一定范围内增大或减小 P - Q 调节范围(加上式(7)的约束后, P - Q 调节范围的上下限将发生变化);机端电压则会影响 P - Q 调节范围的圆心位置与半径大小。由此可见,转速和机端电压对 P - Q 调节范围的影响较大。而转速和机端电压是时变的,即机组的 P - Q 调节范围也是时变的,且运行工况不同使得各机组的 P - Q

调节范围各不相同。因此,在每个决策时段 t ,都应当重新计算每台机组的 P - Q 调节范围,从而正确且充分地调动各机组不同的 P - Q 调节能力。

需要说明的是,第1节中的数学模型以DFIG的有功功率和无功功率为优化变量,而其中的机组转速为未知量,但转速是机组收到有功、无功功率指令后的机组内部控制量,不应由机组外部的系统侧直接指定,本文引入转速是为了更准确、充分地描述和计算机组的 P - Q 调节范围,因此本文未对机组转速设定点进行决策,而是通过量测值代替变量。

由于每个决策时段(优化周期)时间尺度很小,前后2个时段的转速变化量很小,用时段 t 初始时刻的转速量测值 $\omega_{r,i,0}^t$ 代替式(8)中的转速 $\omega_{r,i}^t$,将其转换为已知量。同时为简化计算,考虑到前后2个时段机端电压变化微小,用时段 t 初始时刻的机端电压量测值 $U_{i,0}^t$ 代替式(8)中待求的机端电压 U_i^t 。由此,DFIG在时段 t 的 P - Q 调节范围即可转化为仅由 P_{wi}^t 和 Q_{wi}^t 相互牵制的二维关系,即进行分段线性化^[15]。

忽略机组内部有功功率损耗,根据最大风电功率追踪原理,通过时段 t 初始时刻的风速量测值 v_{wi}^t 求得机组 i 的最大有功出力限值 $P_{wmax,i}^t$ 。通过选取适当的分段点,可将 P - Q 调节范围用若干条直线线性表示,如图A2(b)所示。

2.1.3 时变的线性优化模型

根据上述线性化分析方法,对潮流方程、 P - Q 调节范围等约束条件进行线性化处理,简化后的线性优化模型如式(16)~(21)所示(式(21)为式(7)与式(8)线性化后的统一表达式,式中系数由时段 t 初始时刻的DFIG各状态量的量测值计算得到)。模型中对应变量为各机组有功功率 P_{wi}^t 、无功功率 Q_{wi}^t 以及各节点电压幅值的平方 V_i^t 和支路功率 P_{ij}^t 、 Q_{ij}^t 。

$$\max F = P_{pcc}^t \quad (16)$$

$$V_j^t + K_{V_j, V_i}^t V_i^t + K_{V_j, P_{ij}}^t P_{ij}^t + K_{V_j, Q_{ij}}^t Q_{ij}^t = 0 \quad (17)$$

$$K_{P_{ij}, V_i}^t V_i^t + K_{P_{ij}, P_{ij}}^t P_{ij}^t + K_{P_{ij}, Q_{ij}}^t Q_{ij}^t - \sum_{k \in A} P_{jk}^t + P_{wj}^t = 0 \quad (18)$$

$$K_{Q_{ij}, V_i}^t V_i^t + K_{Q_{ij}, P_{ij}}^t P_{ij}^t + K_{Q_{ij}, Q_{ij}}^t Q_{ij}^t - \sum_{k \in A} Q_{jk}^t + Q_{wj}^t = 0 \quad (19)$$

$$\underline{U}_i^2 \leq V_i^t \leq \bar{U}_i^2 \quad (20)$$

$$a_m^t P_{wi}^t + b_m^t Q_{wi}^t \leq c_m^t \quad (21)$$

其中, K_{V_j, V_i}^t 、 $K_{V_j, P_{ij}}^t$ 、 $K_{V_j, Q_{ij}}^t$ 、 K_{P_{ij}, V_i}^t 、 $K_{P_{ij}, P_{ij}}^t$ 、 $K_{P_{ij}, Q_{ij}}^t$ 、 K_{Q_{ij}, V_i}^t 、 $K_{Q_{ij}, P_{ij}}^t$ 、 $K_{Q_{ij}, Q_{ij}}^t$ 为时段 t 内各电气量的常数系数,由式(13)~(15)推导并利用时段 t 初始时刻的潮流状态量测值计算求得,各参数表达式如附录B式(B1)~(B3)所示; $m=1, 2, \dots, 10$ 为 P - Q 调节范围分段线性化的分段数; a_m^t 、 b_m^t 、 c_m^t 为时段 t 分段线性化后直线的常数系数。通过上述线性化方法,可计算得到DFIG的 P - Q 调节范围中各条直线的表达式。

2.2 时变最优潮流的优化追踪流程

本文提出的时变最优潮流追踪方法利用极短决策时段内的在线潮流量测信息,作为线性化后优化决策模型的已知输入量,对各DFIG有功、无功功率输出进行小额修正,通过各个决策时段(优化周期)的在线、滚动优化,最终实现双馈风电机组并网系统的时变最优潮流追踪,解决由于风电功率不确定性引起的PCC和机组机端节点电压波动问题。求解步骤具体如下,时序关系如图1所示。

(1)量测时段 t 初始时刻机组 i 的运行状态,包括风速 v_{wi}^t 、转速 $\omega_{r,i,0}^t$ 、各节点(包含DFIG机端节点)电压幅值 $U_{i,0}^t$ 以及各支路功率 $P_{ij,0}^t$ 、 $Q_{ij,0}^t$ 等,记为 x_0^t ,由 x_0^t 计算2.1.3节中线性优化模型的相应系数。

(2)根据最大风电功率追踪原理,由风速 v_{wi}^t 计算机组 i 在时段 t 的最大有功功率限值 $P_{wmax,i}^t$ (假定时段 t 内风速保持不变)。

(3)依照2.1.3节,形成线性优化模型,进而求解得到时段 t 各机组的有功功率、无功功率设定值 $\hat{u}_i^t = (P_{wi}^t, Q_{wi}^t)$ 。

(4)将 \hat{u}_i^t 传送给各台DFIG,机组执行有功、无功功率控制指令(通过调节双向PWM变流器、转速、桨距角等机组内部控制措施执行)。返回步骤(1),从而实现滚动优化。

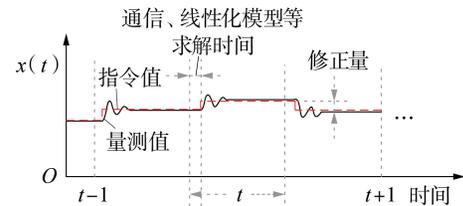


图1 时序关系图

Fig.1 Diagram of sequential relationship

3 算例分析

以山东烟台某双馈风电机组并网系统为例进行算例分析。风电机组共有50台DFIG,每台机组的额定有功功率为1.5 MW。各机组均通过690 V / 35 kV变压器接到35 kV的6条集电电路上,各集电线路长短不一,最终汇集到35 kV / 110 kV变压器的35 kV母线。双馈风电机组再经12.98 km的110 kV输电线路接入220 kV变电站实现并网。系统拓扑结构如附录C图C1所示,图中 U_0 为电网电压。DFIG参数、变压器参数、风电系统内部拓扑结构以及风电系统内部线路参数见附录C表C1~C3。

利用某天00:00~24:00的24 h历史风速数据进行计算分析,各机组的风速、功率输出情况各不相同。同时,假设风电系统内各个节点、支路和DFIG

均有量测和通信设备。

3.1 计算精度与计算速度分析

本文所提的在线时变最优潮流优化追踪方法是以第1节中的非线性优化模型为基础,引入在线量测信息将模型线性化,进而实现对风电系统的在线时变调控。将第1节所提模型直接利用非线性优化方法求得的最优解与本文所提线性化方法的模型求解结果进行对比,分析其计算精度。

以目标函数值为分析对象,对比结果见图2,本文方法计算得到的目标函数值与最优解基本重合,两者间的最大偏差仅为1.9%。为评价本文方法求解所得无功功率结果的准确性,以50号DFIG的无功功率为例,其与最优解的对比如图3所示,最大偏差为4.7%。可见,本文所提方法具有较好的计算精度,能够较好地追踪风电系统的最优潮流状态。

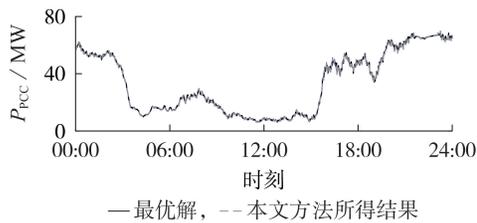


图2 目标函数值对比

Fig.2 Comparison of objective function value

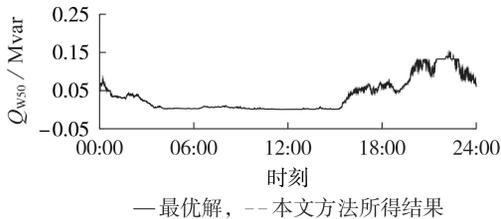


图3 50号DFIG无功功率对比

Fig.3 Comparison of reactive power of No.50 DFIG

本文算例所用的计算机配置为2.5 GHz Intel Core i5-3210, 4 GB RAM, 运行软件为MATLAB 8.3.0.532, 并调用CPLEX求解线性优化模型。经测量,本文方法的线性优化模型平均计算时间为0.0156 s,完全可以实现DFIG的秒级优化。本文算例采用3 s作为优化周期,在满足机组控制器响应时间的同时,保证时变的最优潮流追踪效果。

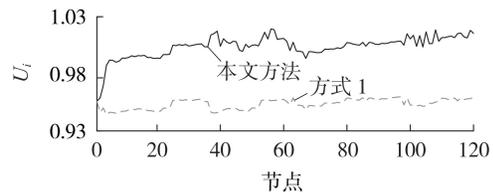
需要补充的是,计算的快速性仅基于在线量测方法(即本文所提方法)的一个优点,另外一个优点是可以避免潮流模型不准确所带来的影响。已往的优化潮流是已知注入功率,根据潮流模型求解潮流状态变量,如果潮流模型不准确,则得到的潮流状态变量就不准确,而基于量测的最优潮流状态变量是已知的,潮流模型仅用来求解灵敏度,因此潮流模型的不准确对计算结果的影响会小很多。

3.2 无功电压控制效果分析

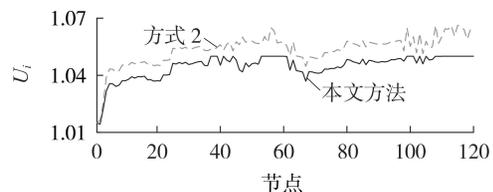
为分析本文方法的无功电压控制效果,以下面

2种并网风电系统无功电压控制方式为例与本文方法进行对比:方式1,各机组按最大有功功率(自然风功率)且以单位功率因数运行,均不参与无功电压调节(此时上级电网对机群PCC处无功功率输出无要求);方式2,各机组的有功输出按各自最大有功功率运行,同时各机组无功输出按各自最大无功功率输出能力进行比例分配。设机群内部节点电压允许的波动范围为0.95~1.05 p.u.,上级电网对PCC处无功输出要求为 $Q_{PCC}=0$ 。

图4(a)为 $U_0=0.96$ p.u.时某时刻方式1与本文方法下各节点电压(标么值,后同)的对比结果。由于双馈风电机组内的变压器、线路等都要消耗无功功率,因此在方式1下许多节点已经低于电压下限,而本文方法则有效地将各节点电压调至较好水平。图4(b)为 $U_0=1.015$ p.u.时某时刻方式2与本文方法下节点电压的对比结果。由图可知,方式2下双馈风电机组内的机组机端电压过高情况较为严重,而在同样保证了机群并网有功功率输出最大的情况下,本文所提方法可通过各机组无功功率输出间的相互协调保证各个节点电压不越限。图5为2种控制方式与本文方法下的网损对比情况,可见本文所提方法中风电系统的有功功率网损最小,无功功率分布更为合理,由于方式1下整个风电系统的支路无功功率流向均为由PCC指向末端机组,存在大范围无功功率转移现象,因此方式1的网损最大。



(a) 本文方法与方式1下的 U_i



(b) 本文方法与方式2下的 U_i

图4 所提方法与方式1、2下各节点电压对比

Fig.4 Voltage amplitude at each node under proposed method and Method 1 and Method 2

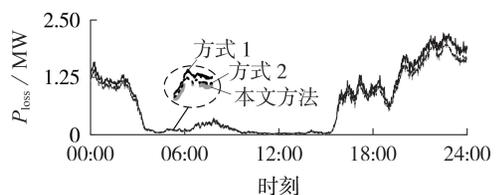


图5 3种方式下的网损情况对比

Fig.5 Comparison of power loss under 3 methods

设定电网电压 $U_0=1.0$ p.u.。图6为方式2与本文方法下双馈风电机组PCC处有功功率输出情况(方式1的有功输出情况与方式2一致,均为按照最大有功功率输出)。由图可知,在21:30—22:30的高风速时段内,为保证电压不越限,本文方法下机群中少量机组出现了有功功率让位于无功功率的现象,相应机组为26、42、50号机组。图7(a)为以42号机组机端节点为例的电压情况对比。由图可知,在21:30—22:30的高风速时段内,方式2的控制方法下处于机群末端的42号机组的机端电压超过上限,本文方法可有效地将其机端电压控制在允许变化范围之内(其他节点电压也均在允许范围内)。图7(b)为42号机组在21:30—22:30时段内的有功功率和无功功率输出情况,为保证其机端电压不超过上限,其通过舍弃少量的有功功率获取额外的无功功率调节能力,解决了风功率过高引起的自身机组机端电压越限问题。

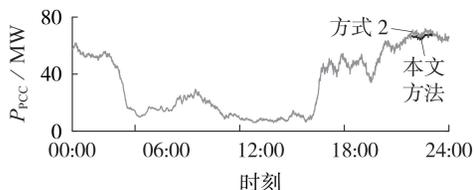


图6 双馈风电机组PCC处的有功功率输出

Fig.6 Active power at PCC of doubly-fed wind turbines

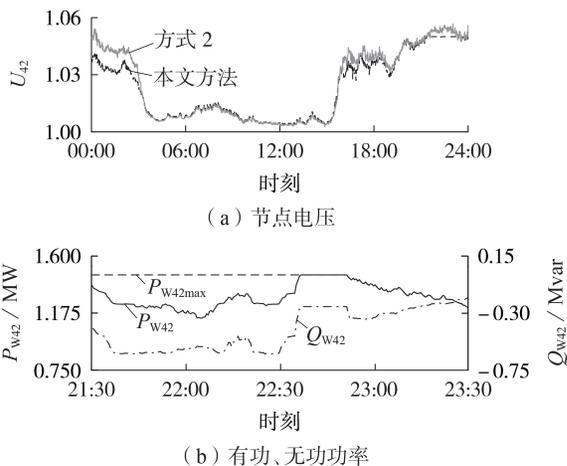


图7 42号机组所在节点电压及有功、无功功率

Fig.7 Voltage amplitude and active and reactive power of No.42 unit

本文的优化调节方式在风电系统接近满发的情况,可能会通过小幅度有功让位于无功的方式,解决电压问题,其带来的电量损失有待分析。经计算,图6中风电系统在这一整天的电量损失占比约为0.19%,可见该电量损失是很小的。而对比方式1,本文方法网损较小,由网损所引起的电量损失更小,两者网损引起的电量损失占比之差约为0.1%,能在

较大程度上弥补本文方法因有功让位所带来的电能损失。为进一步分析减小有功功率输出情况对风电系统带来的电量损失影响,对该风电系统一个月的历史数据进行分析。图8为风电系统9月最大有功功率变化情况,由于有功让位于无功的情况往往仅出现在风电系统各机组接近满发的状态,因此针对图8中有功功率输出大于45 MW的时间段按照本文方法进行优化计算。表1为第1天和第11天中某时段的电量损失情况。由表1可知,在第1天和第11天中的高有功功率输出时段出现有功让位于无功的情况,其损失电量是微乎其微的,由此造成的经济损失也是很小的。

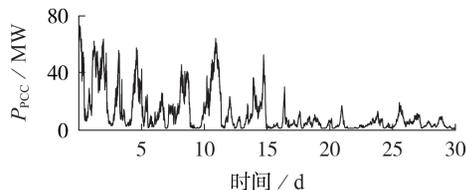


图8 风电系统最大有功功率输出

Fig.8 Maximum active power output of wind power system

表1 电量损失情况

Table 1 Electrical energy loss

时段	损失电量 / (MW·h)	月电量 / (MW·h)	损失电量百分比 / %
第1天 01:35—02:50	2.54	7 296	0.034
第11天 00:10—00:55	1.48	7 296	0.020

通过上述分析可知,风电机组内部的节点电压问题,仅依靠机群PCC处的集中无功补偿无法得到有效的控制,充分调动分布在风电系统各处机组的调节能力,并使所有机组协调合作,能够更好地解决机群内部的电压问题。风电系统潮流状态在线量测可知,保证了设定点决策的快速性,使得风电系统一直运行于(近似)最优潮流状态,从而能够较好地解决风功率不确定性引起的电压问题。

4 结论

本文提出了一种旨在在线、时变追踪双馈风电机组并网系统的最优潮流状态,缓解PCC与机群内部电压问题的优化模型,及其在线时变的求解方法,为风电并网系统的自我管理提供了解决思路。该方法核心思路和创新点在于:①利用分布在机群各处的DFIG不同运行状态下的电力电子化的P-Q调节能力,解决集中式补偿无法有效解决的风电系统内部电压问题;②基于量测与通信设备,利用在线量测信息,避免潮流模型的不准确带来的影响,对各机组功率输出进行秒级的在线调整,充分挖掘和发挥双馈风电机组电力电子化快速无功电压调节潜力,实现风电系统时变最优潮流追踪;③充分考虑DFIG机

组在实际运行中,由于转差率、机端电压变化引起的 $P-Q$ 调节范围的时变性。结果表明,本文方法具有较高的计算精度、较快的计算速度,能够快速、时变地调节DFIG机组的设定值,利用其自身快速、时变的无功功率调节能力或通过有功功率让位无功功率的方式,缓解机群PCC及其内部节点的电压问题,有效应对风功率的波动性。

目前的研究是对双馈风电机组自身治理能力的深度挖掘,而且是考虑电网完全接纳风功率的情况。当机群整体接近满发时或电网要求风电并网系统参与电网的调度时,机群自身可能无法完成任务,需要储能、无功补偿等辅助设备的合作配合,这些问题将在后续研究中进一步深入。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 邵昊舒,王磊,蔡旭. 提高双馈风电机组LVRT能力的改进直接功率控制[J]. 电力自动化设备,2019,39(7):15-22.
SHAO Haoshu,WANG Lei,CAI Xu. Modified direct power control for improving LVRT ability of doubly fed induction generator[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(7):15-22.
- [2] AMARIS H,ALONSO M. Coordinated reactive power management in power networks with wind turbines and FACTS devices[J]. Energy Conversion and Management,2011,52(7):2575-2586.
- [3] 刘其辉,毛未,高瑜. 提升无功调节能力的双馈式风力发电机转速变模式控制策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(9):85-92.
LIU Qihui,MAO Wei,GAO Yu. Variant mode control strategy of rotor speed for DFIG in promoting reactive power adjustment ability[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(9):85-92.
- [4] 高峰,周孝信,赵东来,等. 直驱式风电场功率协调控制策略[J]. 电网技术,2012,36(4):33-38.
GAO Feng,ZHOU Xiaoxin,ZHAO Donglai,et al. Coordinated control of reactive and active power for direct-drive wind farm[J]. Power System Technology,2012,36(4):33-38.
- [5] 朱星旭,韩学山,杨明,等. 含分布式光伏与储能配电网时变最优潮流追踪的分布式算法[J]. 中国电机工程学报,2019,39(9):2644-2657.
ZHU Xingxu,HAN Xueshan,YANG Ming,et al. A distributed algorithm for time-varying optimal power flow tracking in distribution networks with photovoltaics and energy storage[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(9):2644-2657.
- [6] 闫鹏强,王增平,陈振新. 考虑拓扑影响的风电场无功优化策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(11):76-82.
YAN Pengqiang,WANG Zengping,CHEN Zhenxin. Reactive power optimization for wind farm considering impact of topology[J]. Power System Protection and Control,2016,44(11):76-82.
- [7] 符杨,潘翔龙,黄玲玲. 考虑双馈机组无功调节能力的海上风电场无功优化[J]. 电网技术,2014,38(8):2168-2173.
FU Yang,PAN Xianglong,HUANG Lingling. Reactive power optimization for offshore wind farm considering reactive power regulation capability of doubly-fed induction generators[J]. Power System Technology,2014,38(8):2168-2173.

- [8] 杨硕,王伟胜,刘纯,等. 双馈风电场无功电压协调控制策略[J]. 电力系统自动化,2013,37(12):1-6.
YANG Shuo,WANG Weisheng,LIU Chun,et al. Coordinative control strategy for reactive power and voltage of wind farms with doubly-fed induction generators[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(12):1-6.
- [9] 崔杨,徐蒙福,唐耀华,等. 基于集电系统无功灵敏度的双馈风电场无功控制策略[J]. 电网技术,2015,39(9):2418-2423.
CUI Yang,XU Mengfu,TANG Yaohua,et al. Reactive control strategy of DFIG wind farm based on reactive sensitivity of collection system[J]. Power System Technology,2015,39(9):2418-2423.
- [10] 蔡游明,李征,蔡旭. 以并网点电压和机端电压平稳性为目标的风电场无功电压协调控制[J]. 电力自动化设备,2018,38(8):166-173.
CAI Youming,LI Zheng,CAI Xu. Coordinated control of reactive power and voltage for wind farm aiming at voltage stability of PCC and generator terminal[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(8):166-173.
- [11] 严干贵,孙兆键,穆钢,等. 面向集电系统电压调节的风电场无功电压控制策略[J]. 电工技术学报,2015,30(18):140-146.
YAN Gangui,SUN Zhaojian,MU Gang,et al. Collector system voltage regulation oriented reactive power control strategy for wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2015,30(18):140-146.
- [12] CALDERARO V,CONIO G,GALDI V,et al. Optimal decentralized voltage control for distribution systems with inverter-based distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2014,29(1):230-241.
- [13] 刘其辉,赵亚男,毛未. 分散式风电AVC策略[J]. 电力自动化设备,2017,37(8):201-207.
LIU Qihui,ZHAO Yanan,MAO Wei. AVC strategy for distributed wind-power[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(8):201-207.
- [14] DALL'ANESE E,DHOPLE S V,GIANNAKIS G B. Photovoltaic inverter controllers seeking AC optimal power flow solutions[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2016,31(4):2809-2823.
- [15] 李克强,韩学山,李华东,等. 配网中光伏逆变器最优潮流追踪的分布式算法[J]. 中国电机工程学报,2019,39(3):711-720.
LI Keqiang,HAN Xueshan,LI Huadong,et al. Distributed algorithm for optimal power flow pursuit by photovoltaic inverters in distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(3):711-720.

作者简介:



李璐璐

李璐璐(1994—),女,河北唐山人,硕士研究生,主要研究方向为并网风电系统的运行与控制(E-mail:2248324076@qq.com);

韩学山(1959—),男,山东济南人,教授,博士研究生导师,通信作者,主要研究方向为电力系统运行与控制(E-mail:xshan@sdu.edu.cn);

朱星旭(1989—),男,吉林长春人,博士研究生,主要研究方向为电力系统运行与控制(E-mail:xxzhu@mail.sdu.edu.cn)。

李克强(1993—),男,山东潍坊人,博士研究生,主要研究方向为电力系统运行与控制(E-mail:lidong_ee@mail.sdu.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

(下转第96页 continued on page 96)

- [19] 金楚,黎嘉明,徐沈智,等. 大规模光伏发电并网潮流计算及对电网的影响[J]. 电力工程技术,2017,36(1):1-8.
JIN Chu,LI Jiaming,XU Shenzhi,et al. Probabilistic load flow calculation and influence analysis for power grid connected with large scale photovoltaic generation system[J]. Electric Power Engineering Technology,2017,36(1):1-8.
- [20] 马倩,王昭聪,潘学萍,等. 新电改环境下基于效用函数的电网投资决策评价方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(12):198-204.
MA Qian,WANG Zhaocong,PAN Xueping,et al. Evaluation method of power grid investment decision based on utility function under new electricity reform environment[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(12):198-204.
- [21] BARAN M E,WU F F. Network reconfiguration in distribu-

tion systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1989(4):1401-1407.

作者简介:



陈朝宽

陈朝宽(1993—),男,贵州安顺人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统风险评估(E-mail:1004734620@qq.com);

张靖(1979—),男,贵州普定人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统稳定运行与控制(E-mail:zhangjing@gzu.edu.cn)。

(编辑 王锦秀)

Risk assessment of distribution system with photovoltaic based on Cornish-Fisher series and cumulant method

CHEN Chaokuan,ZHANG Jing,HE Yu,FANG Yu,ZENG Xixi,LIANG Longji

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

Abstract: In order to carry out risk assessment of distribution system with photovoltaic accurately and effectively,a cumulant method based on Cornish-Fisher series is proposed to solve the stochastic power flow of distribution system with photovoltaic. The risk indicator of voltage exceeding limit and power flow exceeding limit at system level are established,and the weak points of distribution system with photovoltaic are analyzed to reveal its risk accurately. The cumulant method ensures the high efficiency of stochastic power flow calculation,and the Cornish-Fisher series expansion improves the accuracy of curve fitting under non-normal distribution. The effectiveness and accuracy of the proposed algorithm for risk assessment of distribution system with photovoltaic are verified by MATLAB case simulation.

Key words: distributed photovoltaic;cumulant method;Cornish-Fisher series;stochastic power flow;risk assessment

(上接第62页 continued from page 62)

Method for time-varying optimal power flow tracking of doubly-fed wind turbine grid-connected system

LI Lulu,HAN Xueshan,ZHU Xingxu,LI Keqiang

(Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control,Ministry of Education, Shandong University,Jinan 250061,China)

Abstract: Aiming at the problem that the voltage coordinated control optimization speed of PCC(Point of Common Coupling) and internal nodes of wind power system is hard to catch up with the uncertainty of wind power,a model for time-varying optimal power flow tracking of doubly-fed wind turbine grid-connected system is established,and the online fast solving method of the model is proposed. Based on the real-time measurement and communication technology to make the wind power system observable,the model and solving method focus on the characteristics of minute state variables of wind power system in extremely short optimization period,linearize the model by retaining the first order term of Taylor expansion to obtain the time-varying linearized optimal model,which realize the millisecond level solution of the model,moreover pursuit the optimal power flow state of wind power system in real time. The time-varying regulation range between active and reactive power of doubly-fed induction generator is used to coordinate the output of active and reactive power of each unit,so as to dig the potential of rapid regulation and control of doubly-fed induction generator under the power electronic technology. A practical calculation example of doubly-fed wind turbine grid-connected system is analyzed,the results show that the proposed method can effectively alleviate the voltage problem of PCC and internal nodes of wind power system,and realize the time-varying optimal power flow tracking of wind power system.

Key words: doubly-fed induction generation;wind power system; P - Q regulation range;time-varying optimal power flow tracking;voltage regulation

附录 A

双馈风力发电机组的 P - Q 调节范围，可由其稳态模型推得。DFIG 的稳态等效电路如图 A1 所示。

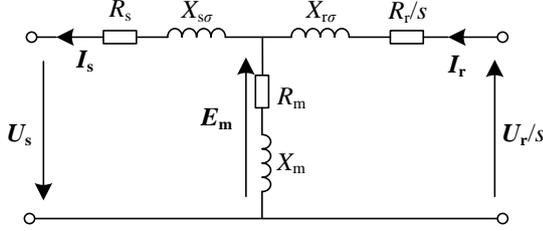


图 A1 DFIG 稳态等效电路
Fig.A1 DFIG equivalent circuit

依据图 A1 所示的稳态等效电路，DFIG 电压电流关系由式 (A1) 决定。

$$\begin{cases} U_s = E_m - (R_s + jX_{s\sigma})I_s \\ U_r/s = E_m + (R_r/s + jX_{r\sigma})I_r \\ E_m = jX_m I_m = jX_m (I_r - I_s) \end{cases} \quad (\text{A1})$$

其中， U_s 、 U_r 和 E_m 分别为定子、转子电压相量和气隙感应电势相量； I_s 、 I_r 和 I_m 分别为定子、转子电流相量和激磁电流相量； $X_{s\sigma}$ 、 $X_{r\sigma}$ 和 X_m 分别为定子、转子漏抗和激磁电抗； R_s 、 R_r 分别为定子、转子电阻； s 为转差率。

在不忽略 DFIG 定转子电阻的情况下，由式 (A1) 可推得定子侧有功功率、无功功率满足：

$$\left(P_s + \frac{3}{2} R_s I_s^2 \right)^2 + \left(Q_s + \frac{3U_s^2}{2X_s} \right)^2 = \left(\frac{3X_m}{2X_s} U_s I_r \right)^2 \quad (\text{A2})$$

$$P_s^2 + Q_s^2 = \left(\frac{3}{2} U_s I_s \right)^2 \quad (\text{A3})$$

其中， P_s 、 Q_s 分别为定子侧有功功率； U_s 、 I_s 分别为定子单相电压峰值、电流峰值； I_r 为转子单相电流峰值； $X_s = X_m + X_{s\sigma}$ 为定子电抗。

由于转子侧电磁功率等于定子侧电磁功率的转差功率，即 $P_{er} = -sP_{es}$ ，忽略定、转子电阻和 PWM 变流器的有功损耗之后，可得转子侧有功功率等于定子侧有功的转差功率，即 $P_r = -sP_s$ 。由于机组总的有功功率为 $P_W = P_r + P_s$ ，因此可将 P_s 替换为 $P_W/(1-s)$ 。在标么值下，有 $\omega_r = 1-s$ ，则 $P_s = P_W/\omega_r$ 。由于 DFIG 会受到转子电压限制和定子电流限制，因此 DFIG 总有功功率输出 P_W 与定子侧无功功率 Q_s 的牵制关系如式 (A4)、(A5) 所示。

$$\left(\frac{P_W}{\omega_r} \right)^2 + \left(Q_s + \frac{3U_s^2}{2X_s} \right)^2 \leq \left(\frac{3X_m}{2X_s} U_s I_{r\max} \right)^2 \quad (\text{A4})$$

$$\left(\frac{P_W}{\omega_r} \right)^2 + Q_s^2 \leq \left(\frac{3}{2} U_s I_{s\max} \right)^2 \quad (\text{A5})$$

其中， $I_{s\max}$ 、 $I_{r\max}$ 分别为定子、转子单相最大允许热电流。

双馈风力发电机组的网侧变流器也具有一定的无功功率调节能力，受容量限制，网侧变流器无功功率 Q_c 和有功功率 P_c 间的牵制关系，如式 (A6) 和式 (A7) 所示。

$$P_c^2 + Q_c^2 \leq S_{c\max}^2 \quad (\text{A6})$$

由于 $P_c = P_r = (1-\omega_r)P_W/\omega_r$ ，则有：

$$\left[\frac{(1-\omega_r)P_W}{\omega_r} \right]^2 + Q_c^2 \leq S_{c\max}^2 \quad (\text{A7})$$

其中， $S_{c\max}$ 为网侧变流器的最大允许容量。

综合式 (A4)、式 (A5)、式 (A7) 得定子侧和网侧变流器的无功功率输出极限分别为式 (A8) 和式 (A9)。

$$\begin{cases} Q_{s\max} = -\frac{3U_s^2}{2X_s} + \sqrt{\left(\frac{3X_m}{2X_s} U_s I_{r\max} \right)^2 - \left(\frac{P_W}{\omega_r} \right)^2} \\ Q_{s\min} = -\sqrt{\left(\frac{3}{2} U_s I_{s\max} \right)^2 - \left(\frac{P_W}{\omega_r} \right)^2} \end{cases} \quad (\text{A8})$$

$$\begin{cases} Q_{c\max} = \sqrt{S_{c\max}^2 - \left[\frac{(1-\omega_r)P_W}{\omega_r} \right]^2} \\ Q_{c\min} = -\sqrt{S_{c\max}^2 - \left[\frac{(1-\omega_r)P_W}{\omega_r} \right]^2} \end{cases} \quad (\text{A9})$$

则双馈风力发电机组无功功率输出上下限如式 (A10) 所示。

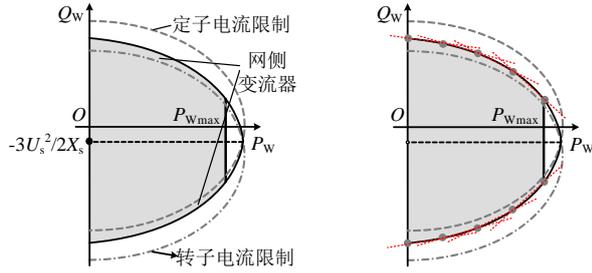
$$\begin{cases} Q_{W\max} = Q_{s\max} + Q_{c\max} \\ Q_{W\min} = Q_{s\min} + Q_{c\min} \end{cases} \quad (\text{A10})$$

DFIG 机组总的无功功率调节范围如式 (A11) 所示。

$$Q_{W\min} \leq Q_W \leq Q_{W\max} \quad (\text{A11})$$

$$0 \leq P_W \leq P_{W\max} \quad (\text{A12})$$

式 (A11)、(A12) 即为双馈风力发电机组的 P - Q 调节范围。由式 (A8) 和式 (A9) 可以看出，该范围不仅仅是有功功率和无功功率间的牵制，还会受到机组的转速、机端电压的影响。在转速及机端电压一定的情况下（即某一运行工况下），双馈风力发电机组的 P - Q 调节范围如图 A1 所示。图 A2 (a) 为 DFIG 机组的 P - Q 调节范围， $-3U_s^2/2X_s$ 代表 DFIG 自身消耗的感性无功功率。由图 A2 (a) 知，当机组未满发时，无功功率可调节的范围较大，当机组满发时，无功功率可调范围就很小。当风速较大，双馈风电机组整体有功功率较高时，机群并网点及其内部节点电压可能过高，此时通过降低某些机组的有功功率，获取额外的无功调节能力，将很大程度上缓解电压问题。



(a) 线性化前 (b) 线性化后

图 A2 线性化前、后 DF IG 机组的 P - Q 调节范围

Fig.A2 DF IG P - Q regulation range before and after linearization

附录 B

$$\begin{cases} K_{V_j, V_i}^t = \frac{z_{ij}^2 S_{ij,0}^2}{V_{i,0}^t} - 1 \\ K_{V_j, P_{ij}}^t = 2 \left(r_{ij} - \frac{z_{ij}^2 P_{ij,0}^t}{V_{i,0}^t} \right) \\ K_{V_j, Q_{ij}}^t = 2 \left(x_{ij} - \frac{z_{ij}^2 Q_{ij,0}^t}{V_{i,0}^t} \right) \end{cases} \quad (\text{B1})$$

$$\begin{cases} K_{P_{ij}, V_i}^t = \frac{r_{ij} S_{ij,0}^2}{V_{i,0}^t} \\ K_{P_{ij}}^t = 1 - \frac{2r_{ij} P_{ij,0}^t}{V_{i,0}^t} \\ K_{P_{ij}, Q_{ij}}^t = -\frac{2r_{ij} Q_{ij,0}^t}{V_{i,0}^t} \end{cases} \quad (\text{B2})$$

$$\begin{cases} K_{Q_{ij}, V_i}^t = \frac{x_{ij} S_{ij,0}^2}{V_{i,0}^t} \\ K_{Q_{ij}, P_{ij}}^t = -\frac{2x_{ij} P_{ij,0}^t}{V_{i,0}^t} \\ K_{Q_{ij}}^t = 1 - \frac{2x_{ij} Q_{ij,0}^t}{V_{i,0}^t} \end{cases} \quad (\text{B3})$$

附录 C

表 C1 双馈风力发电机组参数

Table C1 Parameters of DF IG

参数	数值	参数	数值
额定有功功率	1.5 MW	转子绕组电阻	1.446 m Ω
额定定子线电压	690 V	定子漏抗	0.053 Ω
额定转子相电压	67.97 V	转子漏抗	0.042 Ω
I_{smax}	1565.8 A	励磁电抗	1.72 Ω
I_{rmax}	1649.5 A	同步转速 ω_s	1500 rpm
定子绕组电阻	1.552 m Ω	转速范围	0.8~1.2 p.u.

表 C2 变压器参数

Table C2 Parameters of transformers

参数	35 kV 主变	690 V 箱变
高压侧电压/kV	121	36.5
档位百分比	0.012 5	0.025
档位标识	0	0
低压侧电压/kV	36.5	0.69
容量/(MV·A)	75	2.2
短路损耗/kW	182.9	16.97
短路电压/kV	10.27	6.25
空载损耗/kW	31.21	2.637
空载电流/%	0.12	0.7

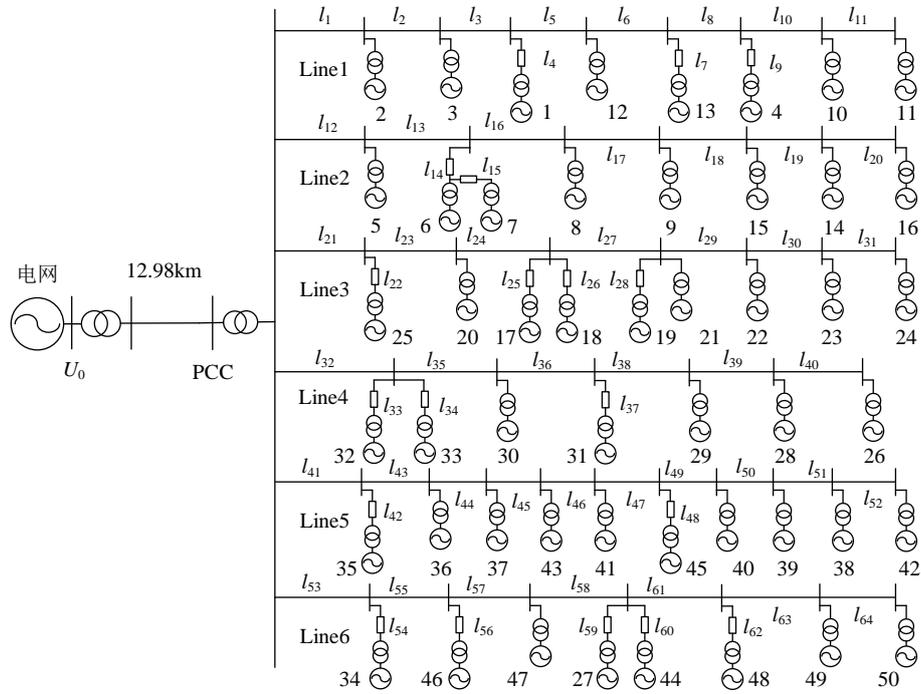


图 C1 风电系统内部拓扑

Fig.C1 Lines of wind power system

表 C3 风电系统内部线路参数

Table C3 Parameters of lines in wind power system

线路	线路型号	线路长度/km									
l_1	LGJ-185	1.471 5	l_{17}	LGJ-185	0.469 0	l_{33}	LGJ-95	0.27	l_{49}	LGJ-95	0.20
l_2	LGJ-185	0.523 0	l_{18}	LGJ-185	1.004 0	l_{34}	LGJ-95	0.40	l_{50}	LGJ-95	0.80
l_3	LGJ-185	0.589 0	l_{19}	LGJ-185	0.167 4	l_{35}	LGJ-185	0.60	l_{51}	LGJ-95	0.47
l_4	LGJ-95	0.523 0	l_{20}	LGJ-185	1.004 0	l_{36}	LGJ-185	0.10	l_{52}	LGJ-95	0.50
l_5	LGJ-185	1.831 0	l_{21}	LGJ-185	7.600 0	l_{37}	LGJ-95	0.47	l_{53}	LGJ-185	2.25
l_6	LGJ-185	0.164 0	l_{22}	LGJ-95	0.261 0	l_{38}	LGJ-95	0.31	l_{54}	LGJ-95	0.32
l_7	LGJ-95	0.621 0	l_{23}	LGJ-185	0.391 0	l_{39}	LGJ-95	0.40	l_{55}	LGJ-185	0.80
l_8	LGJ-95	0.164 0	l_{24}	LGJ-185	0.179 0	l_{40}	LGJ-95	0.60	l_{56}	LGJ-95	0.43
l_9	LGJ-95	0.098 0	l_{25}	LGJ-95	0.522 0	l_{41}	LGJ-185	3.76	l_{57}	LGJ-185	0.30
l_{10}	LGJ-95	1.145 0	l_{26}	LGJ-95	0.815 0	l_{42}	LGJ-95	0.12	l_{58}	LGJ-185	0.24
l_{11}	LGJ-95	0.229 0	l_{27}	LGJ-185	0.293 0	l_{43}	LGJ-185	0.30	l_{59}	LGJ-95	0.40
l_{12}	LGJ-185	3.515 0	l_{28}	LGJ-95	0.326 0	l_{44}	LGJ-185	0.57	l_{60}	LGJ-95	0.43
l_{13}	LGJ-185	0.435 0	l_{29}	LGJ-185	0.978 0	l_{45}	LGJ-185	0.27	l_{61}	LGJ-95	0.56
l_{14}	LGJ-95	1.004 0	l_{30}	LGJ-95	0.554 0	l_{46}	LGJ-185	1.00	l_{62}	LGJ-95	0.18
l_{15}	LGJ-95	0.368 0	l_{31}	LGJ-95	0.652 0	l_{47}	LGJ-185	0.16	l_{63}	LGJ-95	0.64
l_{16}	LGJ-185	0.603 0	l_{32}	LGJ-185	1.080 0	l_{48}	LGJ-95	0.54	l_{64}	LGJ-95	0.40