

基于估测惯量计算的低频减载方法

王怀远,何培灿,江岳文,温步瀛

(福州大学 电气工程与自动化学院,福建 福州 350116)

摘要:新能源发电接入系统的控制方式的不同会给系统的惯量带来不同的影响,研究了基于估测惯量系统功率缺额实时计算方法。首先分析了现有低频减载装置计算系统功率缺额算法的不足。针对这些不足,研究了电压偏移对系统有功缺额的影响,并给出了量化算法;根据扰动后负荷的响应信息,提出了实时辨识系统惯量的方法,由此得到基于估测惯量的系统功率缺额实时计算方法,进而得到最优的自适应切负荷方案。在 IEEE 39 节点系统下进行孤岛系统的仿真,验证了研究得出的电压偏移对系统有功缺额的影响,以及系统惯量的实时辨识、系统功率缺额实时计算的准确性和有效性。与传统的分轮次动作的低频减载方案相比,所提方案的负荷减载量以及动态频率偏移相对更小,频率恢复稳定能力更强。

关键词:低频减载;惯量计算;频率稳定;实时计算;功率缺额

中图分类号:TM 761

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.07.008

0 引言

近年来,随着政府对新能源发电的重视,大量新能源的规划和建设稳步推进。新能源发电往往采用不同于常规同步发电机的发电技术,其静态及动态特性与传统同步机有很大不同,大量接入后会给电网稳定性带来频率稳定性问题^[1-2]。

文献[3]分析了系统出现频率波动时双馈风电机组的响应特性,认为在一般控制策略下,其不能为系统提供惯量支持,因而当双馈风电机组在系统中所占比例提高时,系统惯量会相对减少^[4]。为使风电能够参与系统的频率控制,目前主要有备用容量预留法^[5]和转子动能控制法^[6]这 2 种方法,风电机组可以通过不同的控制方式,为系统提供一定的惯量支持。光伏发电也可以通过变流器实现虚拟惯量控制^[7]。但是,新能源发电为系统提供的虚拟惯量与其运行方式和控制方式相关,随着新能源发电接入比例的增大,系统惯量的随机性也会增加,无法保证传统低频减载装置的有效性。

当系统的频率发生稳定性问题时,可以依靠固定的低频低压减载装置促使系统的频率、电压恢复至额定值附近。目前现场应用的低频减载装置绝大多数为分散安装、独立测量、独立动作的传统逐轮次低频减载装置和在此基础上改良后的半自适应型低频减载装置^[8-9]。但是对于传统逐轮次低频减载优化方案而言,其减载方案的有效性取决于预想事故与实际故障的贴合度,同时无法保证设定的减载方

案在所有故障模式下的效果最优。

近年来,随着广域测量系统(WAMS)在电力系统中逐步安装和发展,不仅实现了主要发电机状态信息的实时量测,同时还搭建了快速的信息传输网络,这为电力系统基于响应的安全稳定控制技术^[10-11]提供了现实条件。文献[12]利用频率响应模型推导了扰动后瞬间系统惯量中心频率下降率与系统不平衡功率的定量比例关系,比例系数为系统等值惯量,这一比例关系成为之后所有自适应低频减载方案的核心算法^[13-16]。

但自适应型低频减载措施存在 2 个问题:①在计算不平衡功率时需要用到系统的惯量,随着新能源发电接入比例的提高,新能源发电为系统提供的惯量会随其运行方式和控制方式发生变化,无法直接给定;②在计算功率缺额时没有考虑系统扰动瞬间负荷电压突变可能带来的影响,使得推算得到的不平衡功率数值与系统实际功率缺额存在差异。

文献[17]首次提出了利用低频减载第一轮的一切负荷量作为扰动值,取切负荷前后 2 点的频率变化率差值计算系统的功率缺额;文献[18]在此基础上,考虑了高渗透率风电接入的情况,改善了传统的低频减载装置,将每轮的动作用量都进行实时修正,但是该方法需要一次切负荷扰动才可以得到系统的功率缺额,在没有切负荷扰动的情况下无法预估系统的功率缺额。

因此,本文在系统惯量未知且在一定时间内能够保持基本不变的基础上,基于负荷侧响应信息对系统的惯量进行估测,由此提出自适应的低频减载方案。围绕没有切负荷扰动的情况,基于负荷特性估测系统的惯量,并分析了现有低频减载技术计算功率缺额时存在的不足,并在此基础上进行改进和修正,提出能够适用于基于估测惯量系统功率缺额的实时计算方法,系统的功率缺额包含了系统不平衡功率

收稿日期:2018-07-16;修回日期:2019-04-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51707040);福建省青年教师教育科研资助项目(JT180018)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51707040) and the Young and Middle-aged Teachers Education Scientific Research Projects of Fujian Province Education Department(JT180018)

和电压偏移造成的有功缺额两部分,由此提出了基于负荷侧响应的新型自适应低频减载控制。

1 现有的低频减载方法的不足

1.1 现有的自适应低频减载不平衡功率计算方法

在电力系统微分方程组中,描述发电机转子运动的方程为:

$$M_i \frac{d\omega_i}{dt} = -\Delta P_i \quad (1)$$

其中, M_i 、 ω_i 和 ΔP_i 分别为第 i 台发电机的转动惯量、转子角速度和不平衡功率。

现有自适应低频减载不平衡功率算法如式(2)所示,即当获取系统等值惯量、惯量中心频率变化率后,可求得系统的不平衡功率,在标么值情况下,发电机转子角速度与频率等价。

$$M_{eq} \frac{df_{coi}}{dt} = -\Delta P \quad (2)$$

其中, ΔP 为系统不平衡功率; M_{eq} 为系统等值惯量, f_{coi} 为惯量中心频率,计算方法分别见式(3)、(4)。

$$M_{eq} = \sum_{i=1}^N M_i \quad (3)$$

$$f_{coi} = \frac{\sum_{i=1}^N M_i f_i}{\sum_{i=1}^N M_i} \quad (4)$$

其中, N 为发电机数量; f_i 为第 i 台发电机的频率。由式(4)可见,惯量中心频率 f_{coi} 的计算就是对各台发电机的频率进行加权平均。

1.2 系统惯量变化对不平衡功率计算造成的影响

由式(2)可见,计算不平衡功率 ΔP 需要知道系统等值惯量 M_{eq} ,而在系统发生大扰动后, M_{eq} 的数值将发生显著变化。为实时获取 M_{eq} 的值,需要建立控制中心和通信网络,迅速确定扰动后 M_{eq} 的值,这对通信网络的速度和可靠性要求很高,在当前实际工程条件下难以实现。

无需控制中心的分散式自适应低频减载继电器^[1]采用固定整定值 M_{set} 替代 M_{eq} ,如式(5)所示。

$$-M_{set} \frac{df_j}{dt} = P_{shed,j} \quad j=1,2,\dots,N_L \quad (5)$$

其中, M_{set} 为 M_{eq} 的整定值; f_j 为第 j 条负荷母线测得频率; $P_{shed,j}$ 为第 j 条负荷母线切负荷比例; N_L 为负荷数量。

M_{set} 的取值决定了式(5)的计算精度,发生小扰动时 M_{eq} 变化不大,恒定的 M_{set} 对计算精度影响不明显。但随着风电渗透率的增加,风电运行方式的改变,或系统发生严重故障时, M_{eq} 将发生较大程度的

变化,恒定的 M_{set} 将导致较大的计算误差。

1.3 系统电压偏移造成的有功缺额影响

负荷静特性如式(6)所示。

$$P_{L,t=T} = P_{L,t=t_0^-} \left(a \frac{U_{t=T}^2}{U_{t=t_0^-}^2} + b \frac{U_{t=T}}{U_{t=t_0^-}} + c \right) (1 + \Delta f)^d \quad (6)$$

其中, $P_{L,t=T}$ 为负荷在扰动后 T 时刻对应的有功功率; $P_{L,t=t_0^-}$ 为负荷在扰动前 t_0^- 时刻对应的有功功率; a 、 b 、 c 分别为负荷中恒阻抗、恒电流和恒功率成分比例; $U_{t=T}$ 和 $U_{t=t_0^-}$ 分别为 T 和 t_0^- 时刻的负荷电压; Δf 为系统频率偏移量; d 为频率响应特性系数。

当系统发生扰动时,频率的偏移量往往很小,对负荷有功的影响主要是由电压偏移量造成的。因此定义系统电压偏移对负荷有功的影响如式(7)所示。

$$\varepsilon = P_{L,t=t_0^-} - P_{L,t=T} \quad (7)$$

在实际中通过量测 $P_{L,t=t_0^-}$ 与 $P_{L,t=T}$ 的数值大小便可获得 ε ,且 ε 体现了电压变化对有功缺额的影响。

低频减载方案的整定一般都基于电压恒定的假设。但在实际系统中,频率与电压相互耦合,动态过程中的电压波动会影响低频减载方案的有效性^[19]。由于当系统发生大扰动后,往往伴随系统电压跌落,令 $U_{t=T} < U_{t=t_0^-}$,则有:

$$0 < \Delta P_{t=T} < \Delta P_{total} \quad (8)$$

式(8)说明,忽略电压偏移使根据式(2)计算得到的不平衡功率 $\Delta P_{t=T}$ 小于实际功率缺额 ΔP_{total} ,根据式(2)计算得到的不平衡功率制定的减载方案有造成欠控的风险。

因此,基于式(5)计算得到的系统不平衡功率需要考虑电压偏移造成的有功缺额影响 ε 。

2 基于响应的电网功率缺额实时计算方法

自适应低频减载装置在计算系统功率缺额时需要用到系统的惯量,但当系统发生扰动时,无法准确获得系统的惯量。

系统在受到扰动时,母线电压会骤降,频率也会降低,由负荷的静特性式(6)可以得出,扰动期间母线电压的幅值变化对负荷有功变化起到主要作用。本文在扰动发生期间的系统频率降低至低频减载装置动作时刻的这段时间内,利用历史数据取 2 个电压差较大的时刻,得到 2 个时刻的负荷有功和频率变化率,利用差值估算系统实际的惯量,进而计算系统不平衡功率,最后再补偿上电压偏移造成的有功缺额影响,得到系统实际功率缺额。

取扰动初期电压差值较大的 2 个时刻 t_1 、 t_2 ,则式(2)对应为:

$$M_{eq} \frac{df}{dt_{t=t_1}} = -\Delta P_{t=t_1} \quad (9)$$

$$M_{eq} \frac{df}{dt_{t=t_2}} = -\Delta P_{t=t_2} \quad (10)$$

其中, t_2 可以取频率达到减载装置启动门槛值的时刻, t_1 可以取为 t_2 前的某一时刻, 本文算例中, t_1 取为 t_2 前 500 ms 对应的时刻; $\frac{df}{dt_{t=t_1}}$ 、 $\frac{df}{dt_{t=t_2}}$ 分别为 t_1 和 t_2 时刻的频率变化率; $\Delta P_{t=t_1}$ 、 $\Delta P_{t=t_2}$ 分别为 t_1 和 t_2 时刻的系统不平衡功率, 计算公式分别如式(11)、式(12)所示。

$$\Delta P_{t=t_1} = P_{L,t=t_1} + P_{Loss,t=t_1} - P_{m,t=t_1} \quad (11)$$

$$\Delta P_{t=t_2} = P_{L,t=t_2} + P_{Loss,t=t_2} - P_{m,t=t_2} \quad (12)$$

其中, $P_{L,t=t_1}$ 、 $P_{m,t=t_1}$ 、 $P_{Loss,t=t_1}$ 分别为 t_1 时刻系统负荷有功、机械有功和损耗; $P_{L,t=t_2}$ 、 $P_{m,t=t_2}$ 、 $P_{Loss,t=t_2}$ 分别为 t_2 时刻系统负荷有功、机械有功和损耗。

将式(11)与式(12)相减, 并忽略机械有功和损耗变化量, 可以得到:

$$M_{eq} \left(\frac{df}{dt_{t=t_1}} - \frac{df}{dt_{t=t_2}} \right) = -(P_{L,t=t_1} - P_{L,t=t_2}) \quad (13)$$

$$M_{eq} = -\frac{P_{L,t=t_1} - P_{L,t=t_2}}{\frac{df}{dt_{t=t_1}} - \frac{df}{dt_{t=t_2}}} \quad (14)$$

其中, $P_{L,t=t_1} - P_{L,t=t_2}$ 即为 2 个时刻的负荷有功变化量。由此可基于频率响应信息估算系统实际的惯量, 然后根据系统当前时刻的频率变化率以及电压偏移带来的影响, 即可获得系统功率缺额如式(15)所示, 其包含了系统不平衡功率与电压偏移造成的有功缺额两部分。

$$\Delta P_{total,t=t_1} = -M_{eq} \frac{df}{dt_{t=t_1}} + \varepsilon_{t=t_1} \quad (15)$$

3 仿真验证

3.1 电压偏移带来的影响

本文采用中国电力科学研究院开发的电力系统分析综合程序(PSASP), 在 IEEE 39 节点系统中验证系统电压偏移对不平衡功率估算的影响, IEEE 39 节点接线图如图 1 所示。

设定扰动为 0.2 s 时刻机组 G_5 和 G_7 同时脱落, 同时线路 16-17、16-15 断线, 即在 IEEE 39 系统的右下角部分建立孤岛, 以此孤岛作为控制对象。其中, 发电机模型采用 E'_q 恒定模型, 带调压器、调压器; 负荷采用综合负荷模型。

表 1 为孤岛电网中发电机的有功功率(标么值)和惯量, 表 2 为负荷节点有功功率(标么值)。

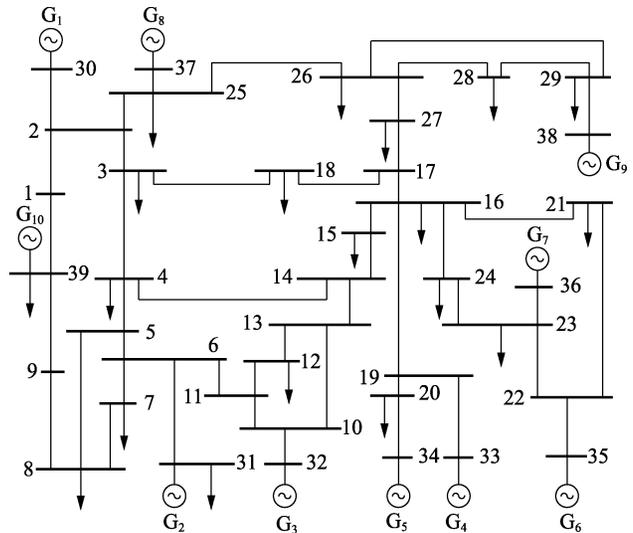


图 1 IEEE 39 节点系统接线图

Fig.1 Wiring diagram of IEEE 39-bus system

表 1 各发电机有功和惯量

Table 1 Active power and inertia of each generator

发电机	有功	惯量/s
G_4	6.32	57.2
G_6	5.08	69.6

表 2 各负荷节点有功功率

Table 2 Active power of each load node

节点	负荷有功
16	3.294
20	6.280
21	2.740
23	2.475
24	3.086

按设定扰动, 得到扰动后的系统机械功率为 $P_{m,t=t_0^+} = 12.82$ p.u., 负荷有功为 $P_{L,t=t_0^-} = 17.875$ p.u., 功率缺额 $\Delta P_{t=t_0^-} = 28.28\%$ 。

定义无法实时获取系统惯量时利用式(2)计算得到的不平衡功率为 P_1 (忽略了惯量和电压变化的影响), 能够实时获取系统惯量时利用式(2)计算得到的不平衡功率为 P_2 (忽略了电压变化的影响), 数值均归算到 $P_{L,t=t_0^-}$ 基准下。

当 T 取不同时刻时, P_1 、 P_2 以及电压偏移造成的影响对比情况见图 2。

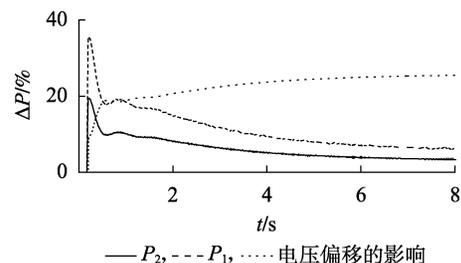


图 2 不平衡功率和电压偏移造成有功缺额的对比

Fig.2 Comparison of unbalanced power and power shortage caused by voltage offset

从图2可以看出:

(1) P_1 与 P_2 的区别在于 P_1 按照故障前的系统惯量进行计算,而 P_2 按照故障后的系统惯量进行计算,两者相差一个倍数的关系;

(2) 电压偏移造成的影响 ε 数值较大,不能被忽略,否则会导致计算得到的系统功率缺额不足。

图3给出了考虑系统惯量变化以及电压偏移的影响时,得到的系统功率缺额与系统实际的功率缺额对比。从图3可以看出,按照实际的系统惯量计算系统不平衡功率,并补偿电压偏移造成的有功缺额,可以较准确地估算系统真实的功率缺额。

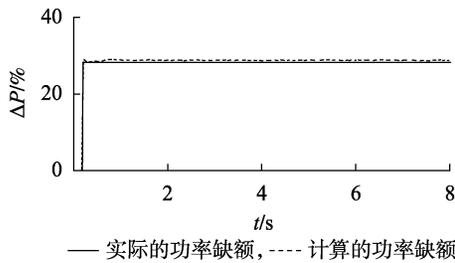


图3 计算与实际的功率缺额对比

Fig.3 Comparison of calculated and actual power deficiency

3.2 系统功率缺额的实时计算

3.2.1 算例1

设定扰动为0.2 s时刻机组 G_5 和 G_7 同时脱落,同时线路16-17、16-15断线,即在图1中右下角部分建立孤岛,负荷包括节点16、20、21、23、24,发电机包括 G_4 和 G_6 。

此时系统的实际功率缺额为5.055 p.u.,转化为百分数为28.28%,系统的惯量为126.8 s。孤岛由于切机和断线产生的功率缺额,首轮切负荷时间为1.67 s,根据式(14)获得孤岛状态下的系统惯量为120.0 s,与真实值126.8 s很接近。

根据估算得到的系统惯量与系统频率的变化率,计算此时系统的不平衡功率为:

$$\Delta P_f = -M_{eq} \frac{df}{dt_{t=1.47s}} = 1.56 \text{ p.u.}$$

电压偏移造成的有功缺额可以根据式(7)进行估算:

$$\varepsilon_{t=1.47s} = P_{L,t=t_0} - P_{L,t=1.47s} = 3.51 \text{ p.u.}$$

因此得到系统总的功率缺额为:

$$\Delta P_{total,t=1.47s} = -M_{eq} \frac{df}{dt_{t=1.47s}} + \varepsilon_{t=1.47s} = 5.07 \text{ p.u.}$$

转化成功率缺额的百分数为28.36%,与实际的功率缺额28.28%非常接近。

本文的低频减载方案为:频率启动门槛值为49 Hz,启动延时为0.2 s,切负荷量为估算的功率缺额。本文低频减载方案具体操作的流程图如图4所示。

传统逐轮次切负荷方案(方案1—4)和文献[18]所提的自适应低频减载方法(方案5)分别见表3—6,本文方案及方案1—5的效果如图5所示。

3.2.2 算例2

设定扰动为0.2 s时刻机组 G_3 、 G_9 同时脱落,同时线路25-26、18-3、14-4、11-6断线,即在IEEE 39

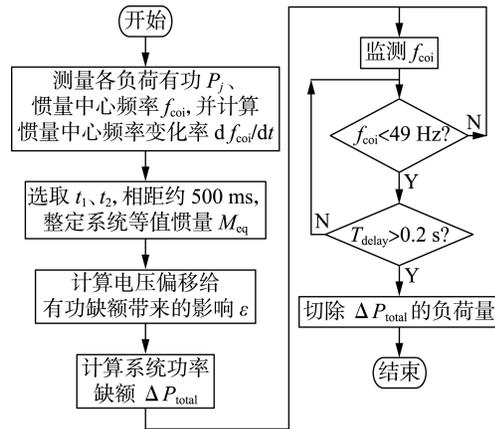


图4 本文低频减载方案流程图

Fig.4 Flowchart of proposed UFLS scheme

表3 某通用逐轮次方案1

Table 3 General-round-by-round load shedding scheme 1

轮数	启动门槛值/Hz	启动延时/s	切负荷量/%
1	0.2	0.2	10
2	0.2	0.2	10
3	0.2	0.2	10
4	10.0	10.0	5
5	15.0	15.0	3

表4 某通用逐轮次方案2

Table 4 General-round-by-round load shedding scheme 2

轮数	启动门槛值/Hz	启动延时/s	切负荷量/%
1	49.00	0.15	12
2	48.80	0.15	8
3	48.60	10.00	8
4	49.25	10.00	5
5	49.25	15.00	3

表5 某通用逐轮次方案3

Table 5 General-round-by-round load shedding scheme 3

轮数	启动门槛值/Hz	启动延时/s	切负荷量/%
1	49.25	0.2	11
2	49.00	0.2	12
3	48.80	0.2	10
4	49.25	10.0	3
5	49.25	15.0	2

表6 某通用逐轮次方案4

Table 6 General-round-by-round load shedding scheme 4

轮数	启动门槛值/Hz	启动延时/s	切负荷量/%
1	49.00	0.2	12
2	48.80	0.2	12
3	48.60	0.2	10
5	49.25	10.0	4

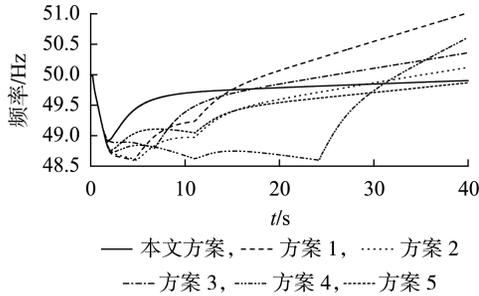


图 5 算例 1 中不同切负荷方案的效果对比
Fig.5 Comparison of effect among load shedding schemes in Case 1

节点系统中的右半部分建立孤岛,负荷包括节点 12、15、16、18、20、21、23、24、26—29,发电机包括 $G_4—G_7$ 。此时系统的实际功率缺额为 8.325 p.u., 转化为百分数为 26.2%。各发电机的有功出力(标么值)和惯量如表 7 所示,各负荷节点的有功功率(标么值)如表 8 所示。

表 7 各发电机有功和惯量

Table 7 Active power and inertia of each generator

发电机	有功	惯量/s
G_4	6.32	57.2
G_5	5.08	52.0
G_6	6.50	69.6
G_7	5.60	52.8

表 8 各负荷节点有功

Table 8 Active power of each load node

节点	负荷有功	节点	负荷有功
12	0.075	23	2.475
15	3.200	24	3.086
16	3.294	26	1.390
18	1.580	27	2.810
20	6.280	28	2.060
21	2.740	29	2.835

设定切负荷启动频率为 49 Hz(0.98 p.u.),启动延迟为 0.2 s。孤岛由于切机和断线产生功率缺额,频率持续下降,在 2.78 s 达到切负荷启动频率 49 Hz,由于启动延迟切负荷动作时间为 2.98 s。

按设定扰动,得到扰动后的系统机械功率为 $P_{m,t=t_0^+} = 23.5$ p.u.,负荷有功为 $P_{L,t=t_0^-} = 31.825$ p.u.,功率缺额为 $\Delta P_{t=t_0^-} = 26.2\%$ 。

根据式(14)获得孤岛状态下的系统惯量为 236.2 s,与真实值 231.6 s 很接近,表明本文算法能够准确估算系统当前状态下的惯量。

然后根据估算得到的系统惯量与系统频率的变化率,计算此时系统的不平衡功率为:

$$\Delta P_t = -M_{eq} \frac{df}{dt_{t=2.78s}} = 1.41 \text{ p.u.}$$

此时电压偏移造成的影响可以根据式(7)进行估算:

$$\varepsilon_{t=2.78s} = P_{L,t=t_0^-} - P_{L,t=2.78s} = 7.44 \text{ p.u.}$$

因此得到系统总的功率缺额为:

$$\Delta P_{total,t=2.78s} = -M_{eq} \frac{df}{dt_{t=2.78s}} + \varepsilon_{t=2.78s} = 8.85 \text{ p.u.}$$

估算的功率缺额转化成百分数为 27.8%,与实际功率缺额十分接近。

通过本文中提出的方法,可以在达到低频减载启动频率 49 Hz 前有效估算系统功率缺额,采取一次性全切的方法,达到更快速恢复到频率稳定的目的。将本文方案与传统逐轮次低频减载方案 1—4、文献[18]提出的方案 5 进行对比,结果如图 6 所示。

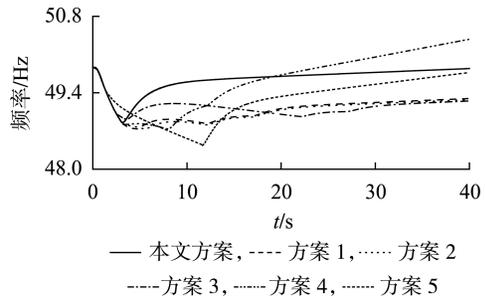


图 6 算例 2 中不同切负荷方案的效果对比
Fig.6 Comparison of effect among load shedding schemes in Case 2

3.2.3 算例 3

设定扰动为 0.2 s 时刻机组 $G_3—G_5$ 同时脱落,同时线路 16—17、4—14、6—11 断线,负荷节点包括 12、15、16、20、21、23、24,负荷模型采用 50%的恒阻抗、30%的恒电流和 20%的恒功率模型,其余条件与算例 2 中相同,以此孤岛作为控制对象。

孤岛内剩余火电机组 G_6 、风电机组 G_7 ,风机采用 DFIG 模型,其控制方式为虚拟惯量控制^[20]。在系统发生扰动过程中,风速保持恒定,控制策略保持不变,按本文方案进行低频减载控制,与传统逐轮次低频减载方案 1—4、文献[18]提出的方案 5 对比结果如图 7 所示。

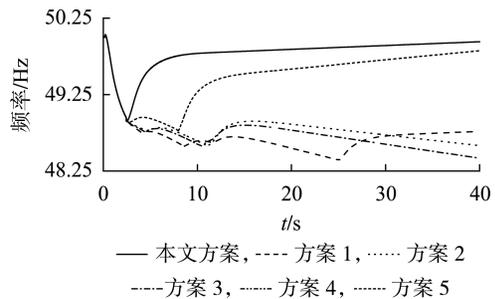


图 7 算例 3 风速恒定时不同方案切负荷效果对比
Fig.7 Comparison of effect among load shedding schemes in Case 3, with constant wind speed

其余条件不变,改变风电机组 G_7 的出力,设置风速随机波动,但系统扰动和风速波动期间,风机 G_7 的控制方式和控制策略保持不变,得到的切负荷

效果对比如图8所示。

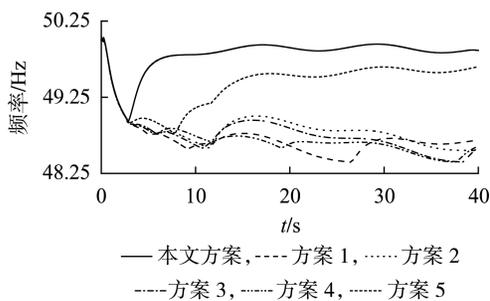


图8 算例3 风速随机波动时不同方案切负荷效果对比

Fig.8 Comparison of effect among load shedding schemes in Case 3, with random fluctuating wind

从图7、8中可以看出,当风力发电机采用固定的控制策略,且在短时间内运行方式和控制策略不发生较大改变时,本文方案利用负荷响应信息,基于估测惯量进行低频减载控制,相较于其他低频减载方案,具有更好的频率恢复特性。

4 结论

本文分析了现有低频减载装置在计算系统功率缺额时的缺点,针对这些不足,研究了电压偏移对系统造成的有功缺额影响,并给出了具体的量化计算方法;同时,根据负荷随电压频率的变化特性,提出了基于负荷侧响应信息的系统惯量实时评估方法,以及系统功率缺额的实时辨识,进而得出自适应切负荷方案。仿真结果表明,本文提出的功率缺额的实时计算方法,能够在没有切负荷控制的前提下,根据负荷的响应信息,快速准确地计算系统的功率缺额,与传统的分轮次低频减载装置相比,该方案的负荷减载量以及动态频率偏移相对更小,频率恢复稳定能力更强,为基于响应的低频减载方案提供一定的指导。

参考文献:

- [1] 刘巨,姚伟,文劲宇,等. 大规模风电参与系统频率调整的技术展望[J]. 电网技术,2014,38(3):638-646.
LIU Ju, YAO Wei, WEN Jinyu, et al. Prospect of technology for large-scale wind farm participating into power grid frequency regulation[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 638-646.
- [2] 薛禹胜,雷兴,薛峰,等. 关于风电不确定性对电力系统影响的评述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):5029-5040.
XUE Yusheng, LEI Xing, XUE Feng, et al. A review on impacts of wind power uncertainties on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5029-5040.
- [3] KAYIKCI M, MILANOVIC J V. Dynamic contribution of DFIG-based wind plants to system frequency disturbances [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 859-867.
- [4] HOLDSWORTH L, EKANAYAKE J B, JENKINS N. Power system frequency response from fixed speed and doubly fed induction generator-based wind turbines [J]. Wind Energy, 2004, 7(1): 21-35.
- [5] 丁磊,尹善耀,王同晓,等. 结合超速备用和模拟惯性的双馈风机频率控制策略[J]. 电网技术,2015,39(9):2385-2391.

- DING Lei, YIN Shanyao, WANG Tongxiao, et al. Integrated frequency control strategy of DFIGs based on virtual inertia and over-speed control [J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2385-2391.
- [6] 刘彬彬,杨健维,廖凯,等. 基于转子动能控制的双馈风电机组频率控制改进方案[J]. 电力系统自动化,2016,40(16):17-22.
LIU Binbin, YANG Jianwei, LIAO Kai, et al. Improved frequency control strategy for DFIG-based wind turbines based on rotor kinetic energy control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 17-22.
- [7] 张祥宇,杨黎,朱晓荣,等. 光储发电系统的虚拟转动惯量控制 [J]. 电力自动化设备,2017,37(9):109-115.
ZHANG Xiangyu, YANG Li, ZHU Xiaorong, et al. Virtual rotational inertia control of PV generation system with energy storage devices [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(9): 109-115.
- [8] SIGRIST L, EGIDO I, ROUCO L. Principles of a centralized UFLS scheme for small isolated power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1779-1786.
- [9] 杨德友,蔡国伟. 减载控制灵敏度及其在广域低频保护中的应用 [J]. 电力自动化设备,2016,36(3):124-128, 135.
YANG Deyou, CAI Guowei. Load shedding control sensitivity and its applications in wide-area low-frequency protection [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 124-128, 135.
- [10] 张保会,王怀远,杨松浩. 电力系统暂态稳定性闭环控制(五)——控制量的实时计算 [J]. 电力自动化设备,2014,34(12):1-5.
ZHANG Baohui, WANG Huaiyuan, YANG Songhao. Closed-loop control of power system transient stability (5): calculation of control quantity [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(12): 1-5.
- [11] 王怀远,张保会,杨松浩,等. 基于相平面特性的切机切负荷紧急控制方法 [J]. 中国电机工程学报,2016,36(15):4144-4151.
WANG Huaiyuan, ZHANG Baohui, YANG Songhao, et al. Combined emergency control strategy of generator tripping and load shedding based on the characteristics of state plane [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4144-4151.
- [12] ANDERSON PM, MIRHEYDAR M. An adaptive method for setting underfrequency load shedding relays [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(2): 647-653.
- [13] 李顺,廖清芬,刘涤尘,等. 基于WAMS的自适应低频减载动态优化策略 [J]. 电力系统保护与控制,2016,44(13):48-54.
LI Shun, LIAO Qingfen, LIU Dichen, et al. WAMS based dynamic optimization of adaptive under-frequency load shedding [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 48-54.
- [14] 李常刚,张恒旭,刘玉田,等. 考虑机组低频保护的电力系统暂态频率稳定评估 [J]. 电工技术学报,2013,28(2):271-278.
LI Changgang, ZHANG Hengxu, LIU Yutian, et al. Power system transient frequency stability assessment considering unit underfrequency relay protection [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 271-278.
- [15] 李顺,廖清芬,刘涤尘,等. 计及电压稳定的自适应协调低频减载策略 [J]. 电力自动化设备,2017,37(12):157-163.
LI Shun, LIAO Qingfen, LIU Dichen, et al. Adaptive coordinated low frequency load shedding strategy considering voltage stability [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12): 157-163.
- [16] 宋兆欧,刘俊勇,刘友波,等. 计及动态修正的自适应广域低频减载 [J]. 电力自动化设备,2014,34(4):95-100, 119.
SONG Zhaou, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. WAMS-based adaptive UFLS considering dynamic correction [J]. Electric Power Auto-

(下转第63页 continued on page 63)

Fault screening and ranking method of static voltage stability considering uncertainty of renewable energy power generation

BAO Haibo¹, GUO Xiaoxuan²

(1. Nanning Power Supply Bureau, Guangxi Power Grid Corporation, Nanning 530031, China;

2. Electric Power Research Institute, Guangxi Power Grid Corporation, Nanning 530023, China)

Abstract: In order to effectively analyze the influence of power system equipment failures and uncertainty of renewable energy power generation on static voltage stability, a fault screening and ranking method of static voltage stability considering uncertainty of renewable energy power generation is proposed. Assuming the average output of each renewable energy power generation, the deterministic voltage stability critical point model under $N-1$ fault scenario is established, and the critical fault set is screened based on the obtained load margin after fault. The voltage stability probability evaluation model under fault scenario is established considering the random distribution of wind power and photovoltaic power generation, and the cumulative probability distribution of load margin under fault scenario is solved by the stochastic response surface method, based on which, two voltage stability ranking indexes are designed to determine the ranking of critical fault sets. Calculative results of the standard IEEE 118-bus system show that, the proposed fault screening and ranking method is effective, and the static voltage stability probability under each fault scenario can be screened and sorted. The probabilistic voltage stability domain of power system, which is established on the basis of the fault ranking result, is conducive to the analysis and study of probability stable boundary.

Key words: renewable energy power generation; static voltage stability; load margin; fault screening and ranking; stochastic response surface method; uncertainties

(上接第56页 continued from page 56)

- mation Equipment, 2014, 34(4):95-100, 119.
- [17] YANG Hao, ZHANG Baohui, MA Shiyang, et al. A novel self-adaptive underfrequency load shedding method based on local measurements [C] // 2013 IEEE Region 10 Conference. Xi'an, China; IEEE, 2013:1-4.
- [18] 李顺, 廖清芬, 唐飞, 等. 高风电渗透率下的自适应低频减载策略研究[J]. 电网技术, 2017, 41(4):1084-1090.
LI Shun, LIAO Qingfen, TANG Fei, et al. Adaptive underfrequency load shedding strategy considering high wind power penetration[J]. Power System Technology, 2017, 41(4):1084-1090.
- [19] 李常刚, 刘玉田, 邱夕兆. 基于暂态频率偏移安全性的低频减载方案优化[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(4):51-56, 61.
LI Changgang, LIU Yutian, QIU Xizhao. Optimization of under-frequency load shedding schemes based on transient frequency deviation security[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4):51-56, 61.
- [20] FU Yuan, WANG Yi, ZHANG Xiangyu. Integrated wind turbine con-

troller with virtual inertia and primary frequency responses for grid dynamic frequency support[J]. IET Renewable Power Generation, 2017, 11(8):1129-1137.

作者简介:



王怀远

王怀远(1987—),男,福建南安人,博士,从事电力系统安全稳定控制方面的研究工作(E-mail:79749544@qq.com);

何培灿(1994—),男,福建龙岩人,硕士研究生,研究方向为电力系统安全稳定控制(E-mail:845015625@qq.com);

江岳文(1977—),女,湖南岳阳人,教授,从事风电并网优化运行方面的研究工作(E-mail:jjangyuewen2008@163.com)。

Under-frequency load shedding scheme based on estimated inertia

WANG Huaiyuan, HE Peican, JIANG Yuewen, WEN Buying

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: Different control methods for new energy power generation access to systems will bring different influences to the inertia of system. The real-time calculation method to calculate power shortage based on estimated inertia is proposed. Firstly, the shortcomings of the existing under-frequency load shedding equipment for calculating power shortage are analyzed. In view of these shortcomings, the influence of voltage deviation on active power balance is studied, and the quantization algorithm is proposed. According to the response information of load after disturbance, a real-time method to recognize system inertia is proposed. Then, the real-time calculation method to calculate power shortage based on estimated inertia is proposed. The simulative results of islanding system in IEEE 39-bus system verify the influence of the voltage offset on the calculation of power shortage, and the veracity and validity of recognizing system inertia and calculating power shortage in real-time. Compared with the traditional round-by-round load shedding schemes, the proposed scheme has relatively small amount of load shedding and dynamic frequency offset and stronger ability of frequency recovery.

Key words: under-frequency load shedding; inertia calculation; frequency stability; real-time calculation; power shortage