

# 一种可在特高压或风电大量接入后减少旋转备用的新方法

郭为民, 魏强, 唐耀华

(国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052)

**摘要:** 由于风电和火电机组相比更加多变, 难以预测, 增加风电的注入水平一般会需要更多的旋转备用, 这会增加成本。调压辅助调频有助于改善这一问题。当风电出力突然大幅度下降导致频率下降时, 可以通过调低负荷电压来减少有功需求、提高事故后电网频率, 然后再通过AGC将频率恢复到正常水平。在指定允许的LOLP或LOLE时, 可以通过概率计算得到这种方法减少的旋转备用数量。调压辅助调频也可在特高压接入后节省需要的旋转备用。仿真计算证明了该方法的有效性。

**关键词:** 频率控制; 旋转备用; 风电; 特高压; 电压降低

## A new approach to decrease reserve demand when bulky wind power or UHV is connected

GUO Wei-min, WEI Qiang, TANG Yao-hua

(Electric Power Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** Since wind power is more versatile and unpredictable than traditional thermal power, increasing wind penetration level generally needs more spinning reserve, which is not economical. Frequency related voltage control can be helpful to solve this problem. When frequency becomes lower due to a sudden sharp decrease of wind farm output, load voltage can be lowered to decrease the demand of active power and improve the grid frequency after the accident. And then AGC is adopted to restore frequency to normal level. Given the loss of load probability (LOLP) or loss of load expected (LOLE), the quantity of spinning reserve can be obtained by probability calculation. This method can also be used when large generation (like 1000 kV UHV line) is lost to avoid load shedding. Simulation also validates the effectiveness of this method.

**Key words:** frequency control; spinning reserve; wind power; UHV transmission; voltage reduction

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)07-0001-07

## 0 引言

随着建设坚强智能电网的不断深入, 我国电网逐步进入了特高压投入运行、新能源广泛接入的新时代。特高压可以避免远距离运送燃煤、充分利用南方水电, 在全国范围内实现资源互补。风电则是一种清洁的可再生能源, 具有减少排放和燃料消耗等显著优点, 所以必然会得到日益广泛的应用。不过, 尽管具有显著的优点, 风电和特高压的运行也带来一些问题, 有待解决。

随着风电注入功率的增多, 系统会遇到暂态稳定、电压、频率等多方面问题。其中, 风电引起的短期频率波动可以通过给DFIG增加调差特性<sup>[1-3]</sup>或通过储能装置<sup>[4-6]</sup>解决, 但是这些手段对于短时间内大幅度的风电出力下降都没有作用。据报道, 风电

出力有可能在15 min内由200 MW下降到30 MW, 幅度高达85%, 并由此引起显著的频率下降<sup>[7]</sup>。所以一般认为, 随着风电注入比例增加, 系统需要更多的旋转备用<sup>[8-9]</sup>。不过, 太多的旋转备用显然是不经济的, 为此也出现了基于概率、蒙特卡罗法或机会约束规划的备用计算方法, 希望能够减少需要的旋转备用数量<sup>[10-11]</sup>。不过, 当预测发生偏差, 风电出力迅速下降等小概率事件发生时, 电网中的功率缺额可能就会超过系统可以动用的旋转备用, 此时就只能靠低频减载切负荷了。

特高压不象风电那样多变和难以预测, 相比之下可靠性和可控性高的多, 但是由于特高压功率巨大, 可能占到省网负荷的10%以上。在发生事故特高压失去的情况下, 造成的功率缺额同样十分巨大。如果按照传统的N-1法则, 就需要和特高压等量甚至更多的火电机组作为旋转备用。这同样很不经济。但是如果如果没有足够的旋转备用, 特高压线路一旦故

障, 系统就必须大量低频减载以维持频率合格, 这会影响数量众多的最终用户, 造成混乱。尽管也有一些优化的减载方案<sup>[12-14]</sup>, 力图通过最少的减载数量达到最优效果, 但是毕竟不能从根本上解决问题。不仅如此, 和风电相比, 特高压造成的功率缺额发生比较突然, 此时由于旋转备用机组爬坡速率的限制, 可能需要几分钟才能让频率恢复正常水平, 在此期间, 系统可能仍由于频率过低而需要低频减载。

为了解决上述问题, 本文提出了一种通过调压辅助调频(Frequency Related Voltage Control, FRVC)的新方法。新方法可以与一次调频和 AGC 共同作用, 在减少旋转备用的同时, 将系统频率尽快恢复到较高的水平。

## 1 调压辅助调频的原理与实现

长期以来, 电力系统一直是频率和电压分别进行调整的。频率和有功相关, 而电压和无功相关。而功率和电压之间存在的相关关系在稳态运行时却很少用到。

不过, 在暂态稳定研究中, 电压和功率的关系还是被广泛应用的。例如, 在事故后的暂态过程中, 励磁维持机端电压可以改善稳定性就是因为电压更高意味着送出更多功率, 所以可以减少加速面积<sup>[15]</sup>。PSS 也是通过调整电压来改变发电机送出的功率来提供阻尼。类似的还有在事故后功角正向摆动将机端电压维持在最大可能电压的尝试<sup>[16]</sup>。反过来, 也有调度机构在事故后有功缺额较大时通过降低系统电压来减少负荷消耗有功、维持功率平衡<sup>[17]</sup>。这都表明有功和电压间的关系可以被利用来维持系统稳定。其实, 这种关系也完全可以在稳态时加以利用。

### 1.1 调整电压可以减少有功需求

调低电压可以减少负荷的有功需求, 具体减少的数额可以根据负荷的种类不同分别计算如下。

#### 1) 恒阻抗模型

对恒阻抗模型来说, 消耗的有功和电压之间存在简单的平方比例关系。因此, 降低电压所能够减少的有功消耗也最明显。如果将电压从 1.0 降低到 0.9, 将可以减少 19%的有功消耗。

#### 2) ZIP 模型

对恒阻抗、恒电流和恒功率结合的负载模型来说, 减少的有功需求应为各部分减少的有功需求之和。假设 ZIP 模型中恒阻抗、恒电流和恒功率功率比例分别为  $k_z, k_i, k_p$ , 调整前后电压比为  $k_u$ , 调整前总功率  $P_1$ , 则调整后总功率应为

$$P_2 = k_z k_u^2 P_1 + k_i k_u P_1 + k_p P_1 \quad (1)$$

调整前后有功消耗的比例为

$$K = \frac{P_2}{P_1} = k_z k_u^2 + k_i k_u + k_p \quad (2)$$

以常用的 343 比例来说, 如果电压从 1.0 调整到 0.9, 则调整前后的比例为  $K=0.903$ , 可以减少 9.7%的有功消耗。

#### 3) 恒阻抗加电动机模型

在这种情况下, 调整电压可以减少的功率消耗不仅与恒阻抗所占的比例相关, 还取决于电动机的参数、初始运行转差和负荷的转差特性。假设恒阻抗和电动机占有比例分别为  $k_z, k_m$ , 调整前后电压比为  $k_u$ , 调整前后电动机功率比为  $k_{vc}$ , 调整前总功率  $P_1$ , 则调整后总功率应为

$$P_2 = k_z k_u^2 P_1 + k_m k_{vc} P_1 \quad (3)$$

所以前后有功消耗的比例为

$$K = \frac{P_2}{P_1} = k_z k_u^2 + k_m k_{vc} \quad (4)$$

计算表明, 对大型的工业电机来说, 降低电压几乎不能减少电机消耗的有功 ( $k_{vc}$  大于 98%), 对小型的民用电机来说, 将电压降低到 0.9 则有功变为原有功的 95%~98%, 如果负荷转矩为二次方特性, 则比例可进一步减少到 92%~96%左右。

如果假设负荷中含有 50%的恒阻抗和 50%的工业电动机, 则最终变化比例  $K$  为 0.905, 如果负荷中含有 50%的恒阻抗和 50%的民用电机, 则比例变为 86.5%~89.5%之间。

也就是说, 对常见的各种负荷组合, 通过把电压从 1.0 调整到 0.9, 都可以使负荷消耗的有功减少 10%~20%左右。由于频率和有功需求密切相关, 在事故后, 通过调整电压减少负荷消耗的有功, 可以提高系统频率, 所以说, 调整电压能够起到辅助调频的作用。

此外, 如果认为事故后甩负荷量已经给定, 而且事故后全网都通过调整电压参与调频, 则正常运行状态下需要的旋转备用也可以等量缩小。如果在某些对电压不敏感的负荷节点将电压进一步调低, 还可以获得更显著的效果。

### 1.2 调压辅助调频在励磁系统中的实现

在调整电压的多种手段当中, 调节励磁是响应最为迅速, 又最方便经济的。图 1 就是一种调压辅助调频励磁系统框图。

图中所示的结构和一般励磁系统并没有很大不

同 (PSS 部分多了一个移相环节只是为了和 PSASP 软件中的模型对应而已)。区别主要是在于增加了一个延迟环节, 输入同样为  $\Delta\omega$ , 输出则与 PSS 一样进行累加。该环节的主要目的是给励磁增加一个随着频率变化而自动调整的分量。如果频率长时间低于额定频率, 则降低机端电压, 反之则提高机端电压。再通过改变负荷消耗的有功间接影响频率。

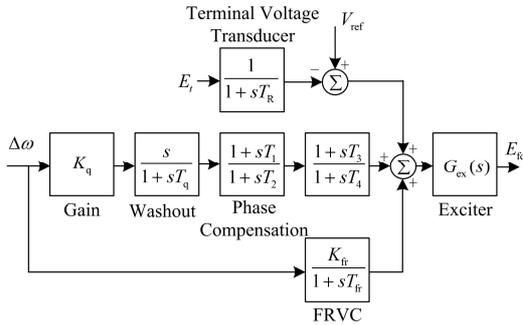


图 1 可以实现调压辅助调频的励磁器结构

Fig. 1 Implementation of FRVC in exciter

在这里, 还有一个需要考虑的问题, 就是发电机的无功功率限制。过去一般认为限制进相运行的主要因素是端部过热。不过随着近年来制造技术的发展, 端部过热已经不再是主要的制约因素。例如, 河南电力试验研究院的试验表明, 在调整变压器分接头 (以确保厂用电电压不会过低) 后, 600 MVA 的发电机可以吸收 200 Mvar 无功。此外, 如果事故后需要通过励磁降低机端电压, 这种工作状态也不会延续太久, 几分钟后就会由其他调压措施来发挥作用, 随后发电机电压就可以逐步恢复正常, 即使有端部过热, 也不会延续太久。

其实, 仔细分析的话可以看出, 由于  $\Delta\omega$  也是频率的反映, PSS 同样具有根据频率调整电压的功能。如果发电机不断加速、频率不断增加, PSS 也会调高励磁电压, 进而使机端电压升高以送出更多的有功来使转子减速。从这个角度讲, PSS 和 FRVC 的作用机理是相似的。不过, 出于平息低频振荡的目的, PSS 被设计的在 0.1~2 Hz 之间具有适当的幅度和相位特性。这种特性不应该因为 FRVC 的增加而被衰弱或改变。所以不应该试图把 FRVC 和 PSS 直接合二为一。更合适的做法是另外增加一个长时间延迟的 FRVC 环节。这样, 高频波动仍通过原有 PSS 路径影响励磁, 而长时间尺度的频率波动则通过 FRVC 路径影响励磁。这种设计可以基本不影响原有 PSS 抑制低频振荡的作用。

### 1.3 通过其他手段实现调压辅助调频

除了可以在励磁系统中增加环节实现 FRVC 之

外, 还可以通过直接指定励磁系统  $V_{ref}$ , 调节变压器分接头, 投切电容器和静止无功补偿器等手段实现 FRVC, 这些手段已经在 AVC 系统中被广泛应用, 在实现 FRVC 时, 只需要将对应指令传递给 AVC 系统即可。

进一步分析可以看出, 上述调节手段是励磁中 FRVC 环节的必要补充。原因可以参考图 2。

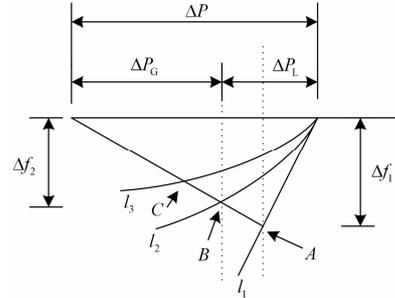


图 2 实施调压辅助调频后的运行点变化

Fig. 2 Running point movement after implementing FRVC

图中,  $l_1$  为不投入 FRVC, 只考虑了负荷频率调节效应的负荷-频率变化曲线,  $l_2$  则为投入了 FRVC 后负荷消耗功率随频率变化曲线,  $l_1$  和  $l_2$  间的差额就是 FRVC 节约的功率。可以看出, 在发电机组调差曲线不变的情况下, 发生大小为  $\Delta P$  的功率缺额后, 最终运行点由 A 改到了 B, 频率变化由  $\Delta f_1$  减小到了  $\Delta f_2$ , 同时参与一次调频机组增发的功率也减少了。

在系统运行点转移到 B 点后, 下一步应该使频率恢复正常。但是如果此时直接增加发电机出力的话, 运行点将沿  $l_2$  向上运动, 与  $l_1$  间的距离越来越小, 也就是说, 励磁中的 FRVC 环节的作用将越来越小, 这在旋转备用不足时是不希望发生的。所以更恰当的做法是, 在 AGC 要求发电机组增发功率之前, 先通过 FRVC 进一步降低电压, 使运行点转移到 C, 然后再通过 AGC 恢复频率, 以避免 FRVC 的作用被削弱。

可以看出, 在整个调整过程中, 励磁中的 FRVC 环节和一次调频的作用类似, 而其他手段实现的 FRVC 和 AGC 作用类似。

从本质上讲, FRVC 是通过牺牲电压来换取频率合格。这看起来似乎不过是用一种坏的结果替换另一种坏的结果。但是事实并非如此, 负荷本身有频率特性和电压特性, 频率降低和电压降低时吸收有功都会减少, 但是实际上, 只能主动地利用电压降低有功减少的规律, 而不能利用频率降低有功减少的规律。这是因为, 电压是个局部值, 可以区分

敏感负荷和不敏感负荷，分门别类地去降压（农电电压甚至降低到 0.8 也问题不大）。但是频率是个全网的参数，如果降低频率，所有负荷发电都会受到影响，而汽轮机的叶片，发电厂的泵和风机、纺织企业等用户是不能承受过大的频率变化的。

另外还应看到，这种方法并不是会频繁使用的一种方法，它应该和低频减载一样，只在危急的时候使用。但是小概率事件毕竟仍会发生，在发生风电出力突然大幅度减少或特高压事故这种小概率事件时，降低全网电压比切除部分负荷的效果还是会好些。

## 2 风电注入增高后 FRVC 可减少旋转备用量的计算

在风电注入比例显著增高后，对系统旋转备用的要求也会增大。此时，简单地按照系统容量的一定比例或按照最大发电机容量来留出旋转备用已经不大合适了。这时比较合适的办法应该是结合概率和可靠性计算来进行旋转备用计算。并且可以把备用分成两个部分，一个部分负责应对传统火电机组可能发生的非计划停机，另外一个部分负责应对负荷预报偏差和风电预报偏差。对后一部分，可以具体计算如下：

假设负荷预报偏差、风电预报偏差均服从正态分布，负荷预报偏差的方差为  $\sigma_{load}$ ，风电预报偏差为  $\sigma_{wp}$ ，并假设这两个正态分布互相独立，那么总的误差分布方差应为

$$\sigma_{total} = \sqrt{\sigma_{wp}^2 + \sigma_{load}^2} \quad (5)$$

为简单记，不考虑发电机非计划停机概率（考虑非计划停机概率的计算公式可参见文献[18]），此时假设任意时刻的旋转备用容量为  $R_s$ ，则可以得到对应的甩负荷概率为

$$p_{ls} = 1 - \Phi\left(\frac{R_s}{\sigma_{total}}\right) \quad (6)$$

也就是说，备用数量和甩负荷概率之间存在相关关系。一般情况下，是已知 LOLP（或 LOLE）要求，此时可以根据 LOLP 要求计算得到甩负荷的概率，并进而计算得到需要的备用数量  $R_{s0}$ ，如图 3。

此时，如果投入 FRVC，并且容许在小概率条件下负荷电压下降到 0.9，则在甩负荷概率不变的情况下需要的系统备用数量变为

$$R_{s1} = R_{s0} - R_{fr}(0.9) \quad (7)$$

其中， $R_{fr}$  为允许负荷电压降低到 0.9 时 FRVC 可减少的负载消耗之和，计算公式为

$$R_{fr}(u) = \sum_{i=1}^n \Delta P_i(u) \quad (8)$$

式中， $\Delta P_i(u)$  是负荷节点  $i$  在电压调整到  $u$  后减少的有功消耗。

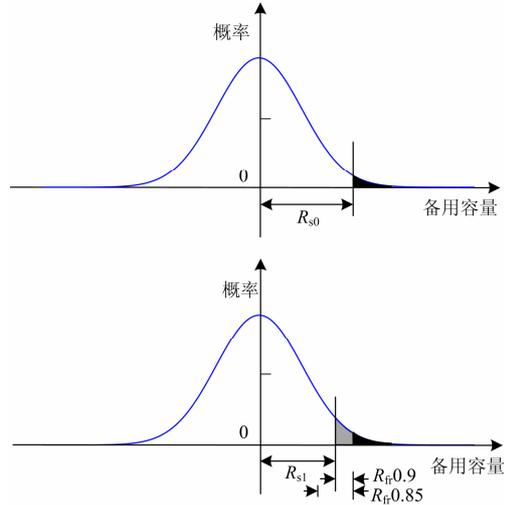


图 3 根据甩负荷概率得到备用容量

Fig. 3 Spinning reserve determined by LOLP

显然，在甩负荷概率相同的情况下，通过 FRVC 可以节省系统需要的旋转备用数量。而且，预报误差较大这样的小概率事件发生时，允许的负荷电压越低，可以节省的旋转备用越多。

在这里，还可以定义类似 LOLP 的负荷低电压允许概率 (Load Low Voltage Probability, LLVP)，并且这个概率可以是一个随电压降低而降低的分段函数。此时，系统旋转备用的确定就需要同时考虑 LOLP 和 LLVP 的限制，显然， $R_s$  越大，发生低电压或甩负荷的概率都会减小。不过，此时的成本会对应增加。这里也同样体现了约束和经济性的相关性，约束越严格，经济性就越差，成本也越高。

## 3 调压辅助调频在特高压故障时的作用

在特高压投入运行后，FRVC 也可以减少为了应对特高压故障而需要的旋转备用。此时方法与前述方法类似，不过此时可以认为特高压发生故障为一给定的小概率事件，并可以根据这个概率确定负荷可以承受的低电压水平，然后即可根据式 (8) 计算最终可以减少的备用数量。

不过，对特高压故障来说，FRVC 的动态行为也同样重要。本节通过算例分析了 FRVC 和 PSS、一次调频的共同作用时的效果。

本节研究使用的算例以 PSASP 软件中提供的 WEPR1 8 机 36 节点为基础。对算例做了下列改动, 以使算例更接近特高压接入后的河南省网:

a) 取消节点 bus23 以及 bus23 和 bus24、bus22、bus9 间的联络线。

b) 将 bus1 上的发电由  $6.23+2.07j$ (标么值,下同) 减少到  $4.369+1.267j$ , 该发电机将在线路永久故障后从系统切除。

c) 将 bus2 上的发电由  $6+3.6j$  减少到  $3+1.8j$ 。

d) 将 bus9 上的负荷由  $3.76+2.21j$  减少到  $1.76+1.21j$ 。

e) 将 bus3 上的发电机额定功率由 750 MW 减少到 350 MW, 这样在发生大的功率缺额时将主要通过 bus2 (而不是 bus3) 上的发电机增发来补充。

更改后的网络结线图见图 4。

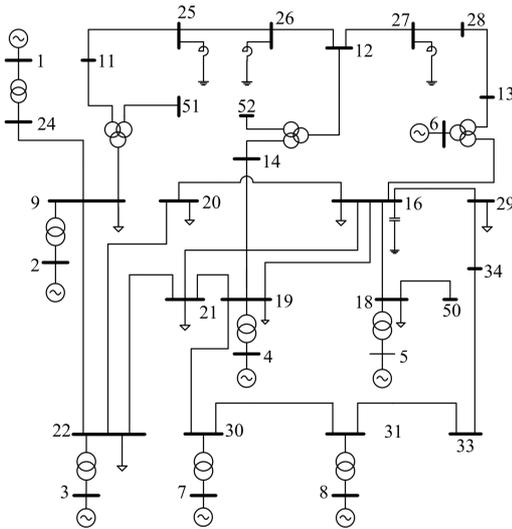


图 4 仿真用系统单线图

Fig. 4 Single line diagram of test system

对该算例, 假设母线 9 与母线 24 间的线路发生三相永久性短路, 0.2 s 后线路跳开清除故障 (为简单记, 这里不考虑自动重合闸), bus1 上的发电机从系统中隔离。此时, 分别设置 bus4, bus5 上的发电机为只投 AVR, 投 PSS 和投 FRVC 进行计算, PSS 和 FRVC 的参数为

$$K_q = 300, T_q = 10 \text{ s}$$

$$T_1 = 0.3, T_2 = 0.05, T_3 = 0.3, T_4 = 0.05$$

$$K_{fr} = 25, T_{fr} = 10 \text{ s}$$

其他发电机均不投 PSS 而只投 AVR, AVR 和调速器模型和参数均使用 PSASP 设置。

计算得到的频率曲线如图 5, 事故发生前后各发电机出力和电压见表 1、表 2。

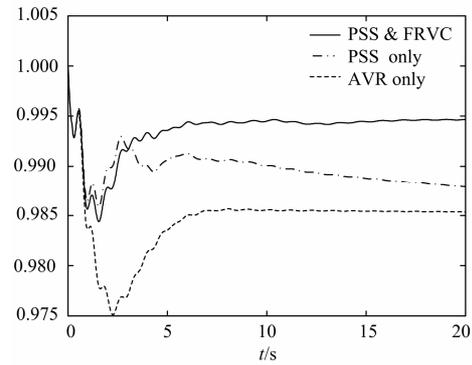


图 5 扰动后的频率变化比较

Fig. 5 Frequency after disturbance

表 1 扰动前后的有功功率(标么值)

Table 1 Active power before and after disturbance

		pu						
		Gen2	Gen3	Gen4	Gen5	Gen6	Gen7	Gen8
扰 动 后	扰动前	3	3.1	1.6	4.3	0	2.25	3.06
	AVR	4.851	3.524	2	5.1	0	2.49	3.387
	PSS	4.327	3.521	2	5.1	0	2.5	3.4
	FRVC	3.750	3.380	1.853	4.941	0	2.519	3.429

表 2 扰动前后的发电机机端电压(标么值)

Table 2 Terminal voltage before and after disturbance

		pu						
		Gen2	Gen3	Gen4	Gen5	Gen6	Gen7	Gen8
扰 动 后	扰动前	0.962	1	1.011	1.034	1	1	1
	AVR	0.957	1	1.007	1.032	1.003	0.997	0.998
	PSS	0.959	0.997	0.955	0.978	0.994	0.996	0.997
	FRVC	0.959	0.998	0.908	0.927	0.917	0.992	0.993

可以看出, 投入 FRVC 以后, 事故后 20 s 的频率由 0.985 3 pu (49.265 Hz) 提高到 0.994 6 pu (49.73 Hz), 提高了 0.465 Hz。在提高频率的同时, 全网的发电之和由 21.35 pu 减少到 19.87 pu, 减少了 1.48, 这大约相当于全网容量的 7%。这个节约的发电就可以被当作旋转备用用来恢复频率。

不仅如此, FRVC 还存在一个优点, 就是响应迅速。在特高压失去这样的大功率缺额发生时, 即使一次调频能够依靠蓄热按照期望的调差特性响应增发大量功率, 这种响应也不可能持久。随后机组功率可能回落, 然后是漫长的爬坡过程, 至少要几分钟频率才能在 AGC 的作用下恢复正常, 这个过程也不可避免地要大量甩负荷。而 FRVC 可以在减少一次调频调整量的同时, 将恢复到较高频率 (0.994 6 pu) 的调整过程缩短到十几秒。这在事故时对系统有重要意义。

在这个算例中, 另外一个值得注意的现象是, 和不投 PSS 相比较, 投入 PSS 后暂态过程中的最低频率从 0.975 pu 抬高到了 0.985 pu, 抬高了 0.5 Hz。出现这个现象的原因是, PSS 在调整过程中为了在减速段阻尼振荡调低了机端电压, 结果起到了和 FRVC 类似的作用。在某种程度上, 这个特点也可以被利用来防止暂态过程中瞬时频率过度下降导致低频减载切除负荷过多。

#### 4 结论

在特高压投入运行或风电大量接入后, 为满足可靠性的要求, 一般需要部署更多的旋转备用。结果导致成本上升, 很不经济。此时, 可以利用调压辅助调频, 当风电出力突然大幅度下降或特高压故障等小概率事件发生时, 通过降低负荷电压、减少负荷有功需求提高事故后系统频率, 等效地减少正常运行时对旋转备用的需求。调压辅助调频可以通过在励磁机中增加延迟环节和给 AVC 发送指令实现。调压辅助调频在风电大量接入时节省的旋转备用数量可以通过概率来计算得到。在特高压故障时, 调压辅助调频还可以在减少旋转备用需求的同时, 将系统频率尽快恢复到较高水平。

#### 参考文献

- [1] RAMTHARAN G, EKANAYAKE J B, JENKINS N. Support for spinning reserve from DFIG based wind turbines[C] // Second International Conference on Industrial and Information Systems, ICIS 2007, Sri Lanka, 2007: 111-115.
- [2] ANAYA-LARA O, HUGHES F M, JENKINS N, et al. Contribution of DFIG-based wind farms to power system short-term frequency regulation[J]. IEE Proc-Gener, Transm, and Distrib, 2006, 153(2): 164-170.
- [3] 陈宁, 于继来. 兼顾系统调频需求的分布式风电分散自治调控策略[J]. 电工技术学报, 2008, 23(11): 123-130.  
CHEN Ning, YU Ji-lai. Strategy for decentralized autonomous regulation of distributed wind power considering system frequency regulation demand[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(11): 123-130.
- [4] LI Wei, JOÓS G, ABBEY C. Wind power impact on system frequency deviation and an ESS based power filtering algorithm solution[C] // Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE '06. 2006 IEEE PES, Atlanta, GA, 2006: 2077-2084.
- [5] 袁小明, 程时杰, 文劲宇. 储能技术在解决大规模风电并网问题中的应用前景分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 3-8, 30.  
YUAN Xiao-ming, CHENG Shi-jie, WEN Jin-yu. Prospects analysis of energy storage application in grid integration of large-scale wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 3-8, 30.
- [6] 于芑, 赵瑜, 周玮, 等. 基于混合储能系统的平抑风电波动功率方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 35-40.  
YU Peng, ZHAO Yu, ZHOU Wei, et al. Research on the method based on hybrid energy storage system for balancing fluctuant wind power[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 35-40.
- [7] GRANT W, EDELSON D, DUMAS J, et al. Change in the air[J]. Power & Energy, 2009, 7(6): 92.
- [8] DANY G. Power reserve in interconnected systems with high wind power production[C] // 2001 IEEE Porto Power Tech Conference, Porto, Portugal, 2001.
- [9] LI Fu-rong, KURI B. Generation scheduling in a system with wind power[C] // 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition, Dalian, China, 2005: 1-6.
- [10] 葛炬, 王飞, 张粒子. 含风电场电力系统旋转备用获取模型[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(6): 32-36.  
GE Ju, WANG Fei, ZHANG Li-zi. Spinning reserve model in the wind power integrated power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(6): 32-36.
- [11] 余民, 杨旻宸, 蒋传文, 等. 风电并网后电力系统可靠性评估和备用优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 100-104, 135.  
YU Min, YANG Min-chen, JIANG Chuan-wen, et al. Study on power system reliability and reserve optimization with wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 100-104, 135.
- [12] 刘少华, 王超, 安军, 等. 计及频率静特性的低频减载方案的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9):

- 140-144.
- LIU Shao-hua, WANG Chao, AN Jun, et al. Study of under-frequency load shedding scheme based on frequency static characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 140-144.
- [13] 李爱民, 蔡泽祥. 基于轨迹分析的互联电网频率动态特性及低频减载的优化[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 171-177.
- LI Ai-min, CAI Ze-xiang. Frequency dynamics analysis and load shedding assessment based on the dynamic simulation trajectory of interconnected power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 171-177.
- [14] 丁明, 黄凯, 李生虎. 概率暂态稳定研究中紧急控制措施的模拟及效果分析[J]. 电工技术学报, 2002, 17(5): 73-78, 91.
- DING Ming, HUANG Kai, LI Sheng-hu. Simulation and effect analysis to the emergency control measures in probabilistic transient stability study[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2002, 17(5): 73-78, 91.
- [15] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. McGraw-Hill, 2012.
- [16] LEE D C, KUNDUR P. Advanced excitation control for power system stability enhancement[C] // CIGRE 38-01, 1986.
- [17] ZAREIPOUR H, CAÑIZARES C A, BHATTACHARYA K. The operation of Ontario's competitive electricity market: overview, experiences, and lessons[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(4): 1782-1793.
- [18] DOHERTY R, O'MALLEY M. A new approach to quantify reserve demand in systems with significant installed wind capacity[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(2): 587-595.
- 
- 收稿日期: 2013-06-26; 修回日期: 2013-08-20
- 作者简介:
- 郭为民(1971-), 男, 学士, 高级工程师, 研究方向为源网协调及电力系统分析与控制; E-mail: guoweimin@ha.sgcc.com.cn
- 魏强(1977-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电压稳定、低频振荡及电力系统分析与控制;
- 唐耀华(1977-), 男, 博士, 工程师, 研究方向为源网协调及电力系统分析与控制。