[电压控制]

基于条件风险价值理论的可再生电源高渗透率区域配电网的电压控制策略

文/高涛[1] 尚学全[1] 周向军[1] 庹明暐[2]
1. 十堰巨能电力设计有限公司；2. 储能与动力电池湖北省重点实验室（湖北汽车工业学院）

在高渗透率可再生能源区域电网中，分布式接入电源和负荷导致电力波动，影响电压稳定，限制了电力供应。研究表明，无功充盈系统对稳态电压控制至关重要。通过建立数学模型、灵敏度分析和控制点选择，确定了调节主变压器电压比为主的电压控制策略。以35 kV输变电系统为例验证了该策略的有效性。

在可再生电源高渗透率区域，电源、负荷以分布方式接入电网，以节省投资，降低能耗，提高电力系统可靠性和灵活性。电源出力和负荷需求的随机型、波动性常常引起系统潮流剧烈变化，甚至出现逆向流动的情况，导致汇集母线电压剧烈波动，严重影响用户用电安全。研究发现，由于主变压器电压选择不合理，主网供电时母线电压偏低，在外送主网时母线电压大幅抬升，即使主变压器调压到极限也无法限制到安全水平，只能限发限供，甚至断网停运，导致弃水、弃光、弃风，影响正常供电。

目前，国内外的研究大多集中在分布式电源对系统的影响，包括大容量分布式发电并入次输电网络对大系统运行、同步和稳定等方面的冲击和影响，中小容量并入低压配电网对继电保护影响等方面，并取得一些研究成果。但是，此类区域的电压质量一直未能得到重视。

考虑到变压器的额定电压、分接头布置、调压方式的选用（无励、有载）和相应的分接范围，以及各级标称电压和供电端、用电端电压的允许偏差，基于减小电压偏差的途径和措施，并结合逆调压、顺调压和恒调压的概念与有载调压变压器的调压条件和范围，本文介绍了一种基于条件风险价值理论的主电压控制的方法。首先，根据单机无穷大系统模型，详细解释了电压偏差的产生机理，并建立了电压偏差与有功功率、无功功率、电阻、电抗以及变比之间的数学关系式，深入分析了实现电压控制的有效途径。其次，通过推导电压偏差的灵敏度公式，估算了各个变量的灵敏度系数，提出了电压控制的优先顺序。最后，基于以上分析，提出了以调节主变压器电压比为核心的电压控制策略，给出理论设计步骤和工程设计流程，并结合实例对该方法进行详细说明。

接入点电压动态变化

配电网运行结构通常呈放射状，考虑分布式电源接入电网时，可以简化为如图1所示的单机-无穷大系统进行分析。

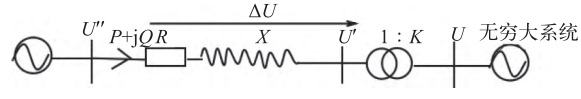

图1 系统电压降落原理图

考虑U''为分布式电源接入点电压，U为无穷大系统（足够远处）母线恒定电压，则U''与U'之间的电势落差ΔU可表示为

$$\Delta U=\frac{PR+QX}{U'}=\frac{PR+QX}{U}K \tag{1}$$

式中，P、Q分别对应外送主网的有功、无功；R为包含线路电阻、变压器等值电阻的综合电阻；X为包含线路电抗、变压器等值电抗的综合电抗；K为理想变压器电压比，可表示为

$$K=K_N\times K'=\frac{U_N}{U'_N} \tag{2}$$

$$U'=\frac{U}{K} \tag{3}$$

式中，K_N为额定电压变比；K'为有载调压变比，季节调节可叠加无励调压；U_N为系统主变压器电网侧额定电压；U'_N为系统主变压器电源侧额定电压；则有功压降ΔU_P、ΔU_R以及无功压降ΔU_Q、ΔU_X可表示为

$$\Delta U_P=\Delta U_R=\frac{PR}{U} \tag{4}$$

$$\Delta U_Q=\Delta U_X=\frac{QX}{U} \tag{5}$$

将式（4）、（5）代入式（1）可以得到

$$\Delta U=(\Delta U_P+\Delta U_Q)K=(\Delta U_R+\Delta U_X)K \tag{6}$$

在正常工作状况下，主变压器电压比K保持不变，默认在P、Q为0时，电压U'为基准电压U''_j。当P、Q不为0时，会导致U''与U'之间出现电势落差，U''会围绕U''_j波动，其幅度差为$\pm\Delta U$。一些负荷、分布式电源剧烈变化的场景下，P、Q波动幅度过大，线路上可能会出现逆向潮流的情况，导致ΔU大幅波动，进一步造成源接入点电压U''超过允许范围，运行在安全可行域之外。在P、Q异向（如发电机进相运行、光伏电站补偿降低）或R、X异值（电容串联过补偿）的场景下，$\Delta U_P(\Delta U_R)$与$\Delta U_Q(\Delta U_X)$会出现相互抵消的情况，使得ΔU与U''的波动幅度减小，通过控制调节可以更加容易地将电源接入点电压控制在允许范围内。即使$P(R)$与$Q(X)$不异向（异值），只要采取无功补偿（电容串联补偿），也能大幅减小$\Delta U_Q(\Delta U_X)$，实现ΔU幅值的减小，进而控制电源接入点电压波动幅度。与此同时，通过选用更大截面积或更优导电性能的导线，结合优化路径的方法，能够有效减小综合电阻R，进而减小有功压降ΔU_R以及电势落差ΔU的幅值，控制P亦然。

ΔU的相对幅值为

$$\begin{aligned}\Delta U\%&=\frac{\Delta U}{U''_N}\times100\%\approx\frac{\Delta U}{U''_j}\times100\%\\&=\frac{PR+QX}{U^2}K^2\times100\%\end{aligned} \tag{7}$$

式中，U''_N为接入点标称额定电压。

通过提升接入电压等级（U''_N，下同），可以降低主变压器电压比K，进而大幅降低分布式电源接入点电压U''波动的绝对幅度和相对幅度。即使在同一电压等级，通过确定U''_j，并合理选择电压比K，可以将U''控制正常区间。反之，电压比K不合理，U''_j不正确，会极大削弱基于P、Q、R、X的电压控制措施的效果，甚至导致系统失稳。

接入点电压灵敏度分析

考虑控制变量P、Q、R、X对ΔU进行灵敏度分析，通过对式（6）进行全微分可以得到

$$\begin{aligned}\frac{\Delta\Delta U}{\Delta U}&=\frac{\Delta U_R}{\Delta U_R+\Delta U_X}\times\frac{\Delta R}{R}+\frac{\Delta U_X}{\Delta U_R+\Delta U_X}\times\frac{\Delta X}{X}\\&+\frac{\Delta U_P}{\Delta U_P+\Delta U_Q}\times\frac{\Delta P}{P}+\frac{\Delta U_Q}{\Delta U_P+\Delta U_Q}\times\frac{\Delta Q}{Q}+\frac{\Delta K}{K}\end{aligned} \tag{8}$$

对灵敏度系数进行定义

$$k_R=\frac{\Delta U_R}{\Delta U_R+\Delta U_X}=\frac{PR}{PR+QX} \tag{9}$$

$$k_X=\frac{\Delta U_X}{\Delta U_R+\Delta U_X}=\frac{QX}{PR+QX} \tag{10}$$

$$k_P=\frac{\Delta U_P}{\Delta U_P+\Delta U_Q}=\frac{PR}{PR+QX} \tag{11}$$

$$k_Q=\frac{\Delta U_Q}{\Delta U_P+\Delta U_Q}=\frac{QX}{PR+QX} \tag{12}$$

$$k_K=1 \tag{13}$$

将式（9）～（13）代入式（8）可以得到

$$\begin{aligned}\frac{\Delta\Delta U}{\Delta U}&=k_R\times\frac{\Delta R}{R}+k_X\times\frac{\Delta X}{X}+k_P\times\frac{\Delta P}{P}\\&+k_Q\times\frac{\Delta Q}{Q}+k_K\frac{\Delta K}{K}\end{aligned} \tag{14}$$

式中，k_R为综合电阻灵敏度系数；k_X为综合电抗灵敏度系数；k_P为有功灵敏度系数，k_Q为无功灵敏度系数；k_K为电压比灵敏度系数。

变比K与U'的函数关系为

$$\Delta U'=-\frac{1}{K^2}U\times\Delta K=-\frac{U}{K}\times\frac{\Delta K}{K}=-U'\times\frac{\Delta K}{K} \tag{15}$$

对于U''来说，ΔU、U'的波动是等效的，对于$\Delta U''$及$\Delta\Delta U''$有

$$\Delta U'' = \Delta U \tag{16}$$

$$\Delta\Delta U'' = \Delta\Delta U + \Delta U \tag{17}$$

对$\Delta U''$进行灵敏度分析可以获得全微分方程

$$\frac{\Delta\Delta U''}{\Delta U''} = k_R \times \frac{\Delta R}{R} + k_X \times \frac{\Delta X}{X} + k_P \times \frac{\Delta P}{P} + k_Q \times \frac{\Delta Q}{Q} + k_K^* \frac{\Delta K}{K} \tag{18}$$

$$k_K^* \leqslant 1 - \frac{U'}{\Delta U} \tag{19}$$

式中，k_K^*为修正变比灵敏度系数。

除了P、Q异向或R、X异值外，灵敏度系数k_R、k_X、k_P、k_Q的绝对值均小于1。即当U''处于临界值时，调节P、Q、R、X参数无法有效改善控制$\Delta U''$。由于线路的允许压降一般不超过10%，主变压器阻抗压降约为10%，故有$k_K^* \leqslant -4$，k_K^*绝对值远大于1且与$\Delta U''$负相关。因此通过调节主变压器电压比K能够有效控制$\Delta U''$。此外，调节P、Q、R、X的方法在实际运行中并不可行：①更换导线以降低R或者安装SVG以调节Q的数值不具备经济性；②电容串联补偿的方法不够现实；③限发限供以调节P、Q与安全供电要求相悖。相比较下，调节主变压器电压比K的方法具备经济性、实用性等优点。主变压器电压比K可以通过额定电压比K_N与有载调压电压比K'的乘积求得，然而有载调压电压比K'可调范围有限（±5～10%），且有载开关动作寿命有限，频繁有载调压可能影响主变压器可靠性。因此，只有合理选择U_N与U'_N（即K_N），才能以最少次数调整有载开关将U''在绝大多数时段控制在合理范围，同时在U''的合理范围内尽量扩大P、Q的允许波动幅度，以满足系统运行的各种工况场景。

基于条件风险价值理论的接入点电压控制策略

条件风险价值理论（Conditional Value-at-Risk，CVaR）是一种风险管理方法，旨在评估在特定条件下的风险敞口和可能的损失。在条件风险价值理论中，除了考虑风险的概率分布外，还会引入条件信息。通过考虑这些条件信息，可以更准确地评估电压失稳风险的潜在影响，并制定相应的风险管理策略。假设每一时刻的有功P服从以当前时刻为期望的正态分布，如图2所示。

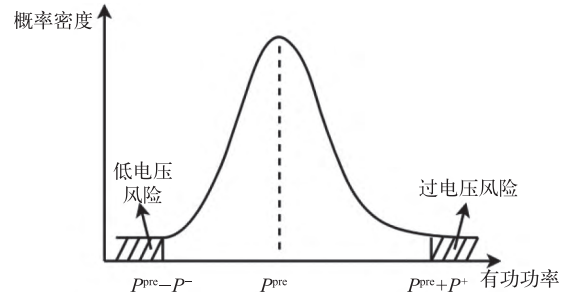

图2　有功功率概率密度曲线

当有功输出高于电压可调节区间上限时存在过电压风险，当有功输出低于电压可调节区间下限时存在低电压风险，可以用条件风险价值来衡量

$$CVaR^+ = \int_{P^{pre}+P^+}^{\bar{P}} (P - P^{pre} - P^+) P_r(P) \mathrm{d}P \tag{20}$$

$$CVaR^- = \int_0^{P^{pre}-P^-} (P^{pre} - P^- - P) P_r(P) \mathrm{d}P \tag{21}$$

式中，$CVaR^+$和$CVaR^-$分别表示过电压风险与低电压风险；$P_r(P)$表示有功功率波动分布的概率密度函数；$\bar{P}$表示有功功率波动的最大值上限。

则配电网节点电压运行风险总成本为

$$C_{risk} = c^{high} CVaR^+ + c^{low} CVaR^- \tag{22}$$

基于节点电压运行风险总成本可以有限选取风险成本最大的节点进行电压控制，并通过调节主变压器电压比K能最大程度地调整U''，$\Delta U''$对主变压器电压比K最为敏感。因此本文提出的最优U''控制策略为：合理选择系统主变压器各侧额定电压，配合有载调压电压比K'。首先将U''限制在合理区间，再依次限制Q、R、X，最后考虑上调电压等级。

1）根据实际运行情况与历史数据统计，确定置信度为95%的P、Q、的波动范围和U''的允许范围。

2）建立单机-无穷大系统，求配电网等效电阻R、和等效电抗X。

3）根据式（1）确定U'的波动范围，在此过程中不考虑有载调压电压比K'，且K_N取U_N与U'_N均为标称电压时的标称电压比。

4）根据U'、U的波动范围（实际工程中不可能有无穷大系统，U仍有波动），合理确定U'_N、U_N。

5）根据确定的K_N，考虑K'，计算各极端工况下的U''，校核其是否在允许范围。

6）若U''超标，则提出限制Q（无功补偿、SVG、进相运行）、R（更换导线）、P（限发限供）等可行措施后，返回步骤5）；迭代若干次

后，可以考虑上调电压等级。

7）当有多点电压需要控制时，可按先系统侧后接入侧、先整体后局部、先高压后低压的顺序渐次进行。

借助PSASP等仿真软件进行上述计算，可以用于调相调压分析，确定变压器的额定电压，校核关注点电压是否越限。针对步骤5）～步骤7），可以开发开式网络潮流计算程序，在线实时计算，精准调节各点电压。

实例分析

图3　秦口35 kV输变电系统图

如图3所示，中坝、上龛两座35 kV变电站接入主网110 kV秦口变电站35 kV　II段母线。

1）中坝主变压器2台（1主1备），容量1.6+6.3 MV·A，电压比均为35±2×2.5%/10.5，；35 kV侧装机14.7 MW，外送13.23～1.47 MW；10 kV侧装机3.32 MW，平衡就地负荷后外送－2.1～3.10 MW。

2）上龛主变压器1台，容量12.5 MV·A，电压比35±2x2.5%/10.5；10 kV侧装机8.6 MW，平衡就地负荷后外送－2.5～7.74 MW。

3）秦口主变压器2台，容量10+31.5 MV·A，变比110±8×1.25%/38.5±2×2.5%/10.5；110 kV侧装机8.805 MW，外送7.93～0.88 MW；35 kV IM装机10.75 MW。平衡就地负荷后外送－4.34～7.68 MW；10 kV侧装机2 MW，就地平衡后不外送。

由于这3座变电所的10 kV母线负责供应居民用电等公共负荷，因此电压调控的首要目标是确保这些母线的电压保持在10.0～10.7 kV范围内，其次是要将35 kV母线的电压波动限制在10%以内。首先需要将线路和主变压器参数输入PSASP软件中，然后将各种工况的运行数据应用于秦口主变压器所在的电网进行潮流计算，以评估各母线电压的变化情况。

在系统分布式电源发电量最大、负荷用电最低的峰小时期，选取秦口主变压器电压为110±8×1.25%/38.5±2×2.5%/10.5、115±8×1.25%/37±2×2.5%/10.5两个系列、（秦口、中坝、上龛）配合调压的7种场景。

1）秦口主变压器　110±8×1.25%/38.5±2×2.5%/10.5 kV，110 kV侧9档、35 kV侧3档（110+0%/38.5+0%）。

表1　峰小期各控制点在7种调控状况下的电压比较

母线	电压/kV（1）	电压/kV（2）	电压/kV（3）	电压/kV（4）	电压/kV（5）	电压/kV（6）	电压/kV（7）
秦口110 kV M	121.32	119.54	121.17	121.24	121.08	121.07	120.60
秦口35 kV IM	43.88	43.27	38.03	40.40	35.01	35.00	34.88
秦口35 kV IIM	43.10	41.85	37.23	39.62	34.21	34.20	33.75
中坝35 kV M	45.98	41.85	40.49	42.71	37.70	37.69	36.82
上龛35 kV M	44.93	41.85	39.28	41.58	36.39	36.37	35.94
秦口10 kV I M	11.77	11.60	10.71	11.26	10.24	10.24	10.20
秦口10 kV IIM	11.75	11.41	10.69	11.24	10.22	10.21	10.08
中坝10 kV M	13.91	12.56	12.28	12.94	11.45	10.91	10.29
上龛10 kV M	13.31	12.25	11.67	12.33	10.84	10.34	10.22

2）中坝、上龛停运，其他同上。

3）秦口主变压器　110±8×1.25%/38.5±2×2.5%/10.5 kV，110 kV侧1档、35 kV侧5档（110+10%/38.5-10%）。

4）秦口主变压器　115±8×1.25%/37±2×2.5%/10.5 kV，110 kV侧9档、35 kV侧3档（115+0%/37+0%）。

5）秦口主变压器　115±8×1.25%/37±2×2.5%/10.5 kV，110 kV侧1档、35 kV侧5档（115+10%/37-10%）。

6）中坝、上龛主变压器均35 kV侧1档（35+5%/10.5），其他同上。

7）中坝变10 kV母线装设4 MVar的SVG（出力约3Mvar），其他同上。

表1展示了上述各运行场景下的各点电压。由场景1）～场景3）可见，由于秦口主变压器当前电压比设置不合理，导致峰小时期各控制点电压均偏高，通过计算控制点电压运行风险总成本，并调整主要控制点主变压器变比要比限制发电出力更能改

善各点电压水平。

在发电最少、用电最多的枯大时期，选取秦口主变压器电压为110±8×1.25%/38.5±2×2.5%/10.5、115±8×1.25%/37±2×2.5%/10.5两个系列、（秦口、中坝、上龛）配合调压的6种运行场景。

1）秦口主变压器。110±8×1.25%/38.5±2×2.5%/10.5 kV，110 kV侧9档、35 kV侧3档（110+0%/38.5+0%）。

2）秦口主变压器。110±8×1.25%/38.5±2×2.5%/10.5 kV，110 kV侧9档、35 kV侧5档（110+0%/38.5-5%）。

3）中坝、上龛主变压器均35 kV侧2档（35+2.5%/10.5），其他同上。

4）秦口主变压器。115±8×1.25%/37±2×2.5%/10.5 kV，110 kV侧9档、35 kV侧3档（115+0%/37+0%）。

5）秦口主变压器。115±8×1.25%/37±2×2.5%/10.5 kV，110 kV侧12档、35 kV侧3档（115-3.75%/37+0%）。

6）中坝、上龛主变压器均35 kV侧2档（35+2.5%/10.5），其他同上。

上述各情况下的各点电压见表2。由表可见，保持秦口主变压器当前电压比，即使在枯大时期也要无励调压，且中坝、上龛配合有载调压，才能使各控制点电压合格。

表2　枯大期各控制点在6种调控状况下的电压比较

母线	电压/kV（1）	电压/kV（2）	电压/kV（3）	电压/kV（4）	电压/kV（5）	电压/kV（6）
秦口110 kV M	110.76	110.75	110.75	110.74	110.75	110.75
秦口35 kV IM	37.52	35.63	35.63	34.34	35.80	35.80
秦口35 kV IIM	38.65	36.72	36.72	35.51	36.91	36.91
中坝35 kV M	38.52	36.57	36.57	35.36	36.77	36.77
上龛35 kV M	37.96	35.99	35.98	34.75	36.19	36.18
秦口10 kV IM	10.38	10.38	10.38	9.91	10.37	10.31
秦口10 kV IIM	10.54	10.54	10.54	10.08	10.48	10.48
中坝10 kV M	11.45	10.87	10.59	10.50	10.92	10.65
上龛10 kV M	11.34	10.75	10.48	10.37	10.81	10.54

由表1情况（7）、表2情况（6）可见，应将秦口主变压器电压比调整为115±8×1.25%/37±2×2.5%/10.5，再在中坝变10 kV母线装设SVG。峰小时，秦口主变压器有载、无励调压，中坝、上龛主变压器有载调压，中坝变无功补偿；枯大时，秦口、中坝、上龛仅主变压器有载调压，就可以将各控制点限制到合理区间。

综上所述，秦口主变压器最优电压等级为115±8×1.25%/37±2×2.5%/10.5 kV。此外，35 kV秦坝线导线型号为LGJ-70，输电容量偏小，如果再换线改造，则秦口35 kV输变电系统就能应对各种工况。

一般情况下，接入大量社会公共负荷的10 kV母线（节点）是最主要的电压控制点，而110 kV主变压器控制范围广，结合文献[2]的规定，有载调压一般以110 kV主变压器为主，不足部分辅以35 kV主变压器、10 kV配电变压器。

结束语

可再生电源高渗透率区域电网无功充盈，本文用单机无穷大系统模型揭示了电压随电力潮流波动的机理。由此推导的电压偏差计算公式表明，主变压器电压比最能影响控制点电压；在此基础上进行电压灵敏度分析，结果显示控制点电压变动对主变压器电压比变化最敏感。基于条件风险价值计算的电压控制策略应优先合理选择系统主变压器各侧额定电压，配合有载调压电压比，尽量将控制点电压限制在合理区间，再依次限制无功、电阻和有功，最后考虑上调电压等级。该策略成功应用于实践，对类似工程具有借鉴意义，也可以推广到实时系统，实现大范围、多电压等级的精准电压调控。EA

（收稿日期：2024-05-07）

参考文献

[1] 裴玮，盛鹃，孔力，等．分布式电源对配网供电电压质量的影响与改善[J]．中国电机工程学报，2008(13)：152-157．

[2] 电力系统电压和无功电力技术导则：GB/T40427—2021[S]．北京：中国电力出版社，2021．

[3] 程浩忠，吴浩．电力系统无功与电压稳定性[M]．北京：中国电力出版社，2004：56-61．

[4] 孔庆东，等．发电 输变电工程接入系统设计报告编写指南[M]．北京：中国电力出版社，2014．