

DOI: 10.7667/PSPC151660

一种补偿电网电压凹陷的 DVR 优化补偿策略

李正明, 李文文, 张国松, 刘亮

(江苏大学电气信息工程学院, 江苏 镇江 212000)

摘要: 针对电网中敏感负荷引起的电压凹陷问题, 以及提高动态电压恢复器(DVR)的补偿质量, 提出了一种优化的综合补偿策略。首先, 详细分析了 DVR 三种基本控制策略的补偿电压与功率流动, 推导出最大跌落支持时间; 然后, 提出了一种跌落前补偿向最小能量补偿过渡的优化综合补偿策略, 利用一次过渡曲线将跌落前补偿的电压幅值与相角逐渐过渡到最小能量补偿的值, 物理意义明确, 减小电压相位跳变的同时增加补偿时间。算例分析结果表明, 该法较单一补偿方法显著增加了 DVR 的补偿时间。仿真结果验证了该方法的有效性。

关键词: 电压凹陷; 动态电压恢复器; 补偿时间; 综合补偿策略

An optimized compensation strategy of DVR for grid voltage sag compensation

LI Zhengming, LI Wenwen, ZHANG Guosong, LIU Liang

(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212000, China)

Abstract: To solve the voltage sag problems of grid caused by sensitive load and improve the compensation efficiency of dynamic voltage restorer (DVR), an optimized comprehensive strategy is proposed. Firstly, the power flow and the maximum compensation time of DVR are analyzed using three basic compensation strategies. Then, the phase jump is corrected by pre-sag compensation. And, a transition curve, which involves the injected voltage phases of pre-sag strategy and minimum energy strategy, is used to transform pre-sag compensation to minimum energy compensation of DVR. As a result, the proposed strategy increases the supporting time for long voltage sags. The analytical study shows that the presented method significantly increases compensation time of DVR. The simulation results performed by Matlab/Simulink also confirm the effectiveness of the proposed method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477070).

Key words: voltage sag; dynamic voltage restorer; compensation time; comprehensive compensation strategy

0 引言

微网作为分布式发电接入电网的一种有效技术手段, 综合利用多种能源, 得到了广泛的关注^[1]。大电网可提供安全稳定的电力支撑, 并能满足用户多样化的用电需求, 但其本身也存在着不可忽略的电能质量问题, 其中电压跌落已成为最主要的问题之一^[2]。电网内部通常含有大量非线性电力电子器件及间歇性电源和敏感负荷, 频繁的启停及操作引起电压波动, 不仅造成设备损坏, 给用户和生产带来不便, 甚至会造成巨大的经济损失^[3]。因此, 为治理电网中的电能质量问题, 将柔性交流输电技术

引入其中, 包括 SVC、D-STATCOM、DVR 和 UPQC 等补偿设备^[4-7]。DVR 是目前减缓电压波动影响的最有力措施之一, 可治理电压暂降、暂升、闪变, 并可有效抑制电压谐波、三相不平衡等问题^[8]。

由于相角跳变的补偿需要 DVR 的直流单元提供较大的补偿电压与充足的能量, 导致直流储能电容的成本很高, 且只有小部分存储在直流电容上的能量被利用, 使得 DVR 几乎不能补偿长时电压凹陷^[9-10]。目前的控制策略只能单一的减少补偿电压幅值或优化利用储能, 为了避免这些缺点, 需对 DVR 的补偿策略进行优化^[11]。现阶段研究应用的 DVR 补偿策略主要有跌落前补偿法、同相补偿法和最小能量法^[12-15]。其中, 利用无功补偿减少直流储能的最小能量法^[13]或通过减小 DVR 注入电压的同相补偿法^[15], 均不能补偿相角跳变, 可能导致敏感

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51477070); 江苏省优势学科建设工程项目(苏财教[2014]37号)

负荷跳闸。跌落前补偿法可完全补偿凹陷电压的幅值和相角, 保证电压的连续, 但相角跳变的补偿需储能系统大量能量支撑^[14]。

文献[15]提出了跌落前补偿和最小能量补偿的综合补偿策略, 初期采用完全补偿使凹陷电压的幅值与相角恢复到跌落前的值, 待稳定后转为最小能量补偿, 增加补偿时间并优化能量利用, 但两者之间无过渡, 易引起电压畸变。本文对 DVR 三种基本策略的补偿电压与功率流动进行分析, 推导出最大凹陷支持时间, 对跌落前补偿和最小能量补偿综合补偿策略进行优化, 求出 DVR 注入电压幅值与相角初始值, 根据转换坡度多步旋转补偿电压相位, 直至最小能量法注入终止值, 减小相角直接跳变对敏感负载的影响, 并采用迭代循环模块避免深度凹陷时的超调变问题。该策略不仅减小电压相位跳变, 且相比单一补偿法显著提高了补偿时间。

1 DVR 三种基本补偿策略

DVR 的系统结构由直流电容器(储能装置)、逆变电路、LC 滤波电路、串联变压器组成, 如图 1 所示。DVR 的主要功能是当系统电压发生凹陷时, 通过逆变器将储能系统的直流电压转换后, 经过滤波器和变压器向馈线注入一定幅值和相角的交流补偿电压, 使负载侧电压恢复到正常值, 确保敏感性负荷的正常运行。

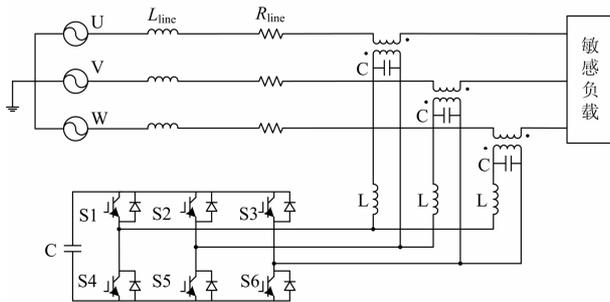


图 1 DVR 系统结构图

Fig. 1 Topology of DVR

根据三种基本补偿方法, 用相量图的形式详细地分析了各自的特点, 分别给出补偿电压与相角。其中, U_G 、 U_S 为跌落前后的系统侧电压; U_L 、 U_A 为跌落前后负荷侧电压; U_{DVR} 为 DVR 输出的补偿电压; I_L 为负荷电流; P_{DVR} 和 Q_{DVR} 为 DVR 注入系统的有功和无功率; δ 为电压凹陷时的跳变相角; θ_L 为负荷功率因数角, 以负荷电流 I_L 作为参考向量, 如图 2 所示。设 ΔU 为电压凹陷深度, 则 $\Delta U = (U_L - U_S) / U_L$ 。

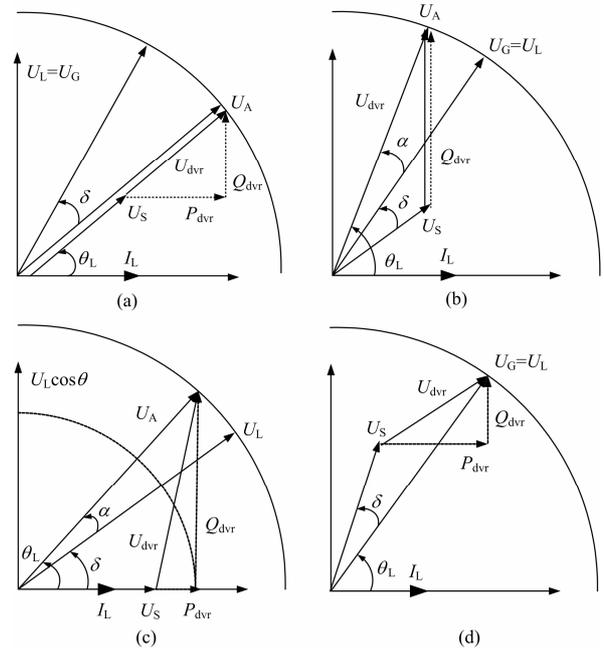


图 2 DVR 三种基本补偿策略相量图

Fig. 2 Phase diagram for three basic compensation strategies

1.1 同相补偿

对于同相补偿法, DVR 的补偿电压与瞬时电网电压同相位, 幅值为负荷参考电压与电网电压之差, 如图 2(a) 所示。这种补偿方式只需测量电网侧瞬时电压, 补偿速度快且补偿电压幅值最小, 但无法补偿相位跳变, 因此可能会导致负荷电压波形的断续。DVR 注入系统的电压的幅值与相角为

$$U_{DVR} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_L \Delta U \quad (1)$$

$$\angle U_{DVR} = \theta_L \quad (2)$$

1.2 最小能量补偿

在无功补偿法中, DVR 向系统注入的电压与负荷电流正交, 只提供无功功率进行补偿, 不消耗自身的有功功率。如图 2(b) 所示, 其注入电压的幅值与相位为

$$U_{DVR} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_L \sqrt{1 - 2(1 - \Delta U) \cos(\alpha + \delta) + (1 - \Delta U)^2} \quad (3)$$

$$\angle U_{DVR} = \frac{\pi}{2} \quad (4)$$

式中, α 是 DVR 无功补偿引起的相角变化。无功补偿可补偿的最大凹陷深度 ΔU_{max} 与负荷功率因数密切相关:

$$\Delta U_{max} \leq (1 - \cos \theta_L) \quad (5)$$

当电网侧凹陷电压 U_S 与负荷电流 I_L 同相时, 补偿电压达到最大, 相应的最大注入电压为

$$U_{\max} = \frac{U_s}{1 - \Delta U_{\max}} \sin \theta_L \quad (6)$$

当电压凹陷深度超过式(5)时, DVR 需向系统注入一定的有功功率来维持补偿, 针对这一情况, 利用最小能量法以增强无功补偿的性能。如图 2(c)所示, DVR 最小能量法注入电压的幅值和相位为

$$U_{\text{DVR}} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_L \sqrt{1 - 2(1 - \Delta U) \cos \theta_L + (1 - \Delta U)^2} \quad (7)$$

$$\angle U_{\text{DVR}} = \tan^{-1} \left(\frac{U_L \sin \theta_L}{U_L \cos \theta_L - U_s} \right) \quad (8)$$

1.3 跌落前补偿

系统发生电压跌落时, 通常表现为电压幅值的减小并伴随着电压相位的改变。利用跌落前补偿法可使补偿后的电压幅值和相位与补偿前完全一致, 前述的方法均不能补偿相角跳变, 但完全补偿的实现要求 DVR 的容量和蓄能装置提供的能量足够大。如图 2(d)所示, DVR 注入电压的幅值和相位为

$$U_{\text{DVR}} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_L \sqrt{1 - 2(1 - \Delta U) \cos \delta + (1 - \Delta U)^2} \quad (9)$$

$$\angle U_{\text{DVR}} = \tan^{-1} \left(\frac{U_L \sin \theta_L - U_L \sin(\theta_L + \delta)}{U_L \cos \theta_L - U_s \cos(\theta_L + \delta)} \right) \quad (10)$$

2 DVR 的功率流向与最大补偿时间

DVR 向系统注入的有功功率为网侧有功功率与负载侧有功功率之差, 由图 2(a)、2(c)、2(d)可得, 跌落前补偿、同相补偿、最小能量补偿三种基本策略的有功功率 P_{DVR} 可分别表示为

$$P_{\text{pre}} = \sqrt{3} U_L I_L (\cos \theta_L - (1 - \Delta U) \cos(\theta_L - \delta)) \quad (11)$$

$$P_{\text{in-phase}} = \sqrt{3} U_L I_L \Delta U \cos \theta_L \quad (12)$$

$$P_{\text{opt}} = \sqrt{3} U_L I_L (\cos \theta_L - 1 + \Delta U) \quad (13)$$

由上述三式可得 DVR 有功功率与凹陷深度、相角跳变和负载功率因数的关系。跌落前补偿虽可补偿凹陷电压的幅值和相角, 比较式(11)~式(13), 可看出跌落前补偿是一种高耗能补偿策略, 消耗有功功率为三种补偿法中最大。当跳变角 δ 一定时, DVR 输出的有功功率随着凹陷深度和负载功率因数的增加而增加, 这就要求跌落前补偿法的直流储能环节有充足的能量。在实际应用中, DVR 的储能却是有限的, 输出功率达到一定的限值, 补偿的电压值就会下降。为使 DVR 适当操作, 应满足:

$$\frac{U_{\text{DVR}}}{n_t} \leq \frac{m_{\max} U_{\text{dc}}}{2} \quad (14)$$

式中: n_t 为串联变压器的匝数比; m_{\max} 为 DVR 逆变器的最大调制指数; U_{DVR} 为 DVR 注入电压; U_{dc} 为直流电压。一旦直流电压降低到最小值, 即超过式(14)的限值, DVR 便停止补偿进程以避免负载电压的谐波污染。储存在直流电容中的最初能量为

$$W_{\text{dc}} = \frac{1}{2} C_{\text{dc}} U_{\text{dc}}^2 \quad (15)$$

经过一段时间间隔 Δt 以后, 直流电容器中的电压由初始值 U_{dc} 减小到 U_{dcf} , 电压变化量为 ΔU_{dc} 。此时储存在电容器中的最终能量为

$$W_{\text{dcf}} = \frac{1}{2} C_{\text{dc}} U_{\text{dcf}}^2 \quad (16)$$

由式(16)可得, 在 Δt 期间, 直流电容器在稳定状态下提供的总有功功率为

$$P_{\text{dc}} = \frac{W_{\text{dc}} - W_{\text{dcf}}}{\Delta t} = \frac{1}{2} C_{\text{dc}} \frac{d}{dt} U_{\text{dc}}^2 = \frac{1}{2} C_{\text{dc}} \left(\frac{U_{\text{dc}}^2 - U_{\text{dcf}}^2}{\Delta t} \right) \quad (17)$$

将 DVR 视为一个理想系统, 则式(17)中的直流功率与式(11)中的交流功率相等, 从而可得出电容 C 的容量。但直流电压会随功率的流动而降低, 输出的补偿电压也将降低。相应地, 直流电容的容量与使负载电压正常恢复的最小直流电压也限制了 DVR 输出的有功功率。此外, 直流电压的梯度 dU_{dc}/dt 与 DVR 注入的有功功率 P_{DVR} 直接成正比。 P_{DVR} 越小, 直流电压的斜率越小, 补偿时间越长。可知改善直流电压的下降速率可延长补偿时间。

基于上述分析, 引入另一重要的变量: 最大补偿时间 t_{\max} , 其直接体现了直流电容中储存能量的利用程度。由式(14)、式(17)可得最大补偿时间为

$$t_{\max} = \frac{C \times \left[U_{\text{dc}}^2 - \left(\frac{2 \times U_{\text{DVR}}}{m_{\max} \times n_t} \right)^2 \right]}{2 \times P_{\text{DVR}}} \quad (18)$$

3 优化综合补偿策略

根据以上分析, 本文提出了一种优化综合补偿策略, 通过调节 DVR 注入有功功率的大小对直流电压的梯度进行控制以扩展 DVR 的补偿时间。首先利用跌落前补偿法使凹陷电压的幅值和相角恢复到凹陷前的值, 为减少补偿过程中负载侧电压的相位跳变, 引入一个过渡过程将补偿电压逐渐过渡到最小能量注入方式, 避免运行点相角直接跳变。这一调节过程通常在一到两个周期内实现, 恢复时间短, 电压可恢复至稳态。详细的补偿控制过程如下。

3.1 检测相角跳变

补偿初期, 为减少电压畸变, 将凹陷电压的幅

值和相角恢复到凹陷前。由于电容的放电, 调制指数将增大, 经过一定的时间, 若无充足的能量支撑, DVR 将不能进行适当的补偿。因此, 一旦达到一定的调制指数, 跌落前补偿便向最小能量补偿过渡。

为检测相角跳变, 分别在负载电压侧与电网侧利用两个锁相环(PLL)^[16]。一旦检测到凹陷, 首先确定 DVR 注入的初相角以补偿负载侧相角跳变: 一方面通过冻结负载电压侧 PLL 锁定凹陷前相角 θ_{VLP} , 另一方面通过网侧 PLL 锁定网侧电压相角 θ_{VG} 。稳态时这两个角度是相等的, 发生凹陷时两个相角之差即为相角跳变 δ , 可由此计算 DVR 注入的初相角:

$$\theta_{\text{first}} = \tan^{-1} \left(\frac{U_L \sin \theta_L - U_S \sin(\theta_L + \delta)}{U_L \cos \theta_L - U_S \cos(\theta_L + \delta)} \right) \quad (19)$$

利用空间矢量法检测电压跌落, 则负载参考电压(标幺值, 1 p.u.)和实际电网电压(p.u.)之间的绝对值, 即凹陷深度(当 $\Delta U \geq 0.1$, 被认为电压凹陷), 在同步 dq 轴参考坐标系下可以表示为

$$\Delta U = \left| 1 - \sqrt{U_{Gd}^2 + U_{Gq}^2} \right| \quad (20)$$

3.2 过渡过程

一旦跌落电压完全恢复, 经过一个到两个周期的缓冲, 使跌落前补偿平滑地向最小能量补偿过渡。

由 1.2 节可知, 最小能量法工作在两种情况: 凹陷深度较浅时进行无功补偿, DVR 工作在自给模式, 几乎不从电网中吸收有功功率, 或者为克服系统损失只吸收很少的有功功率以维持直流电压恒定; 对于较深的凹陷深度须进行最小能量补偿, 此时 DVR 向电网注入一定的有功功率, 储存在直流电容器中的能量减小, 其电压也逐渐减小。为维持逆变器输出端所需的电压, 其调制指数将会增大, 直到达到式(14)中的阈值。一旦超过式(14)中的限制, 逆变器进入超调变, 不能维持额定的负载电压。为避免这种情况, 本文利用一个迭代控制回路监测直流电压使之不超过最小阈值。

根据上述分析及式(6)、式(8), 可得 DVR 注入的终止角 θ_{final} 为

$$\theta_{\text{final}} = \begin{cases} \frac{\pi}{2} + \varepsilon, & \Delta U \leq (1 - \cos \theta_L) \\ \pi - \tan^{-1} \left(\frac{U_L \sin \theta_L}{U_L \cos \theta_L - U_S} \right), & \Delta U > (1 - \cos \theta_L) \end{cases} \quad (21)$$

式中, ε 表示由于组件损耗引起的变化。在迭代控制环节, 控制 θ_{final} 的衰减率使 DVR 的直流电压 U_{dc} 不超过最小限值:

$$\theta_{\text{final}} = \theta_{\text{final}} - v \quad (22)$$

式中, v 表示衰减量。为保证平滑地过渡, 逐步旋转负载电压相位以减小相位跳变对敏感负荷的影响, 给出初始与终止角的转换坡度:

$$\theta_{\text{tran}} = \theta_{\text{first}} + \frac{\theta_{\text{final}} - \theta_{\text{first}}}{\Delta t_{\text{tran}}} t \quad (23)$$

式中, Δt_{tran} 为过渡曲线的斜率。

3.3 操作过程与控制框图

如图 3 所示, 以三个步骤显示从跌落前补偿到最小能量补偿的过渡。在图示中, 设凹陷深度超过式(5)的极限, 即 $\Delta U > (1 - \cos \theta_L)$, 并伴随电压凹陷产生正向相角跳变。DVR 首先利用跌落前补偿法将凹陷电压的幅值和相位恢复到凹陷前, 一旦 DVR 直流电压或者调制指数达到一定的极限, 引入一个过渡过程避免运行点的电压直接跳变, 将补偿电压逐渐过渡到最小能量注入值。过渡过程中, DVR 补偿的无功功率逐渐增大, 注入电压的幅值和相角也逐渐变化, 直到 U_A 达到 $U_{A\text{-opt}}$ 。

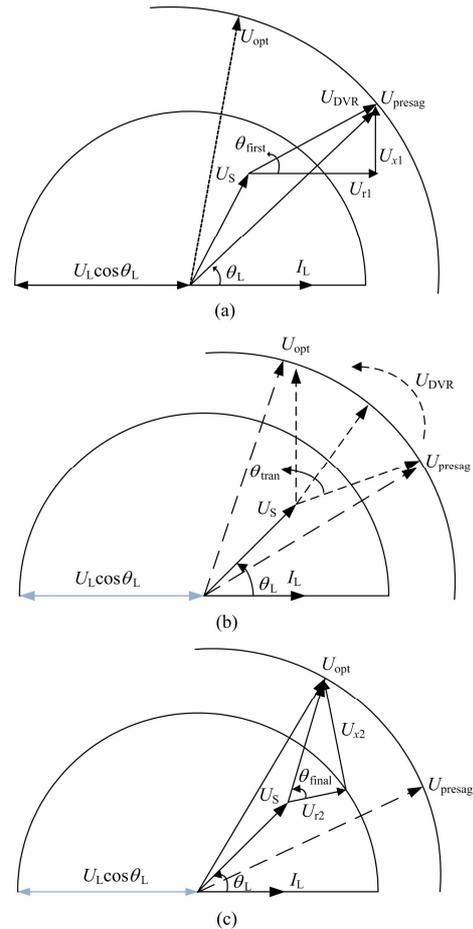
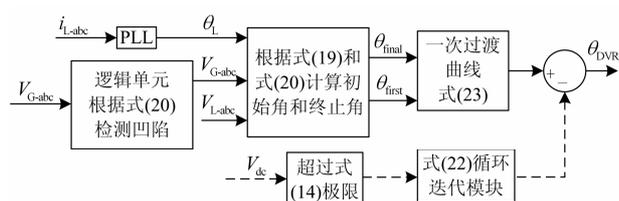


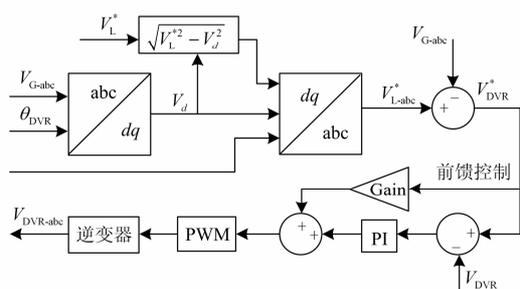
图 3 综合控制策略的相量图

Fig. 3 Phase diagram for the compound control strategy

如图 4 所示为优化综合补偿策略的详细框图, 根据式(20), 采用逻辑单元实时监控电网电压的凹陷。将控制系统分为两个子模块获得负载参考电压: 计算 DVR 注入初始角与终止角; 最小能量补偿的过渡。通过 PLL 获得线电流并作为参考电流以实现有功和无功功率的解耦控制。对于相角检测模块, 通过 PLL 可以计算出跌落前补偿的 DVR 初始注入角与最小能量补偿的终止注入角。过渡结束后, 最小能量模块给出参考电压 $U_{L-abc}^* = U_{opt}$ 。DVR 生成的参考电压 U_{DVR}^* 与实际的电压的差值经过 PI 控制器准确跟踪 DVR 的参考电压, 并添加一个前馈控制信号以补偿 DVR 系统的损失。当 DVR 的调制指数达到最大或者直流电压接近极限时, 启用迭代控制模块调节注入相角 θ_{final} 避免超调变的情况。



(a) 跳变检测模块控制原理图



(b) 最小能量法过渡控制框图

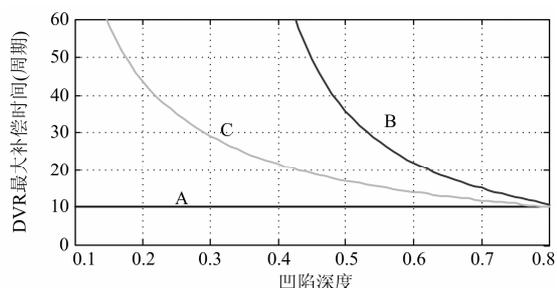
图 4 DVR 综合策略控制框图

Fig. 4 Diagram of compound control strategy for DVR

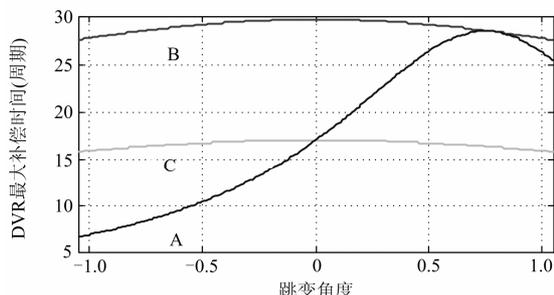
4 不同策略补偿时间比较与仿真分析

4.1 补偿电压与时间对比

最大补偿时间是 DVR 性能的一项重要参考指标。由上述分析, 对同相补偿、跌落前补偿与提出综合补偿的补偿时间进行比较。由式(1)、式(12)、式(7)、式(13), 式(9)、式(11)和式(18), 可得图 5(a) 所示不同补偿策略的最大补偿时间随凹陷深度的变化曲线; 凹陷深度一定, 改变凹陷跳变角度, 其他条件不变时, 可得图 5(b) 所示不同补偿策略的最大补偿时间随跳变角的变化曲线。图 5 中 A、B、C 三条曲线分别代表跌落前补偿、同相补偿和提出的综合补偿。



(a) DVR 最大补偿时间与凹陷深度



(b) DVR 最大补偿时间与跳变角度

图 5 DVR 最大补偿时间与补偿电压分析

Fig. 5 Maximum compensation time and injected voltage for different methods

凹陷深度设为额定电压 380 V 的 10% 到 80% 的范围, 视在功率为 9 kVA, 功率因数保持在 0.7(滞后), 相角跳变取正向跳变 45° , 周期为 20 ms, 变压器变比与最大调制指数均为 1。由图 5(a) 可知, 在相同凹陷深度下, 提出的综合补偿法在所比较的策略中具有最长的凹陷支持时间。当凹陷深度为 50% 时, 同相补偿比跌落前补偿有较高的补偿时间, 综合补偿法则在同相补偿的基础上提高 20 个周期。当凹陷深度低于 30% 时, 综合补偿策略中 DVR 工作在自给模式, 补偿时间可无限长。DVR 直流环节有功功率的最少化利用, 使得其电容放电速率达到最慢, 从而显著改善补偿时间。由图 5(b) 可知, 当凹陷深度为 50%, 其他条件不变, 跳变相角范围为 -60° 到 60° 时, 最大补偿时间随相角跳变的变化趋势, 同相补偿与综合补偿的补偿时间随相角跳变的变化不大, 跌落前补偿的补偿时间随相角跳变的变化明显, 综合补偿法具有最长的最大补偿时间。

4.2 仿真分析

如图 1 所示, 以 380 V 放射状型电网为例^[17-18], 在末端以 R-L 负载表示敏感负荷, 跳变相角为 25° , 对凹陷深度为 50% 的三相对称电压凹陷进行 Matlab 仿真验证, 其中频率为 50 Hz, 周期为 20 ms, 过渡曲线斜率 Δt_{tran} 取 40 ms。则 DVR 注入的初始角度为 23.8° , 终止角为 106.3° 。

如图 6 所示, 其凹陷深度为 50%, 凹陷开始时间为 0.1 s。由 DVR 在补偿阶段所注入的电压与功率可看出, 在初始阶段一个周期内 DVR 通过注入大量有功功率补偿相角跳变, 经过两个周期后, 逐渐过渡到最小能量补偿模式, 注入电压根据过渡曲线平滑过渡, 注入有功逐渐减小并稳定。经过 DVR 的恢复后, 负载电压的幅值和相位恢复到稳定。

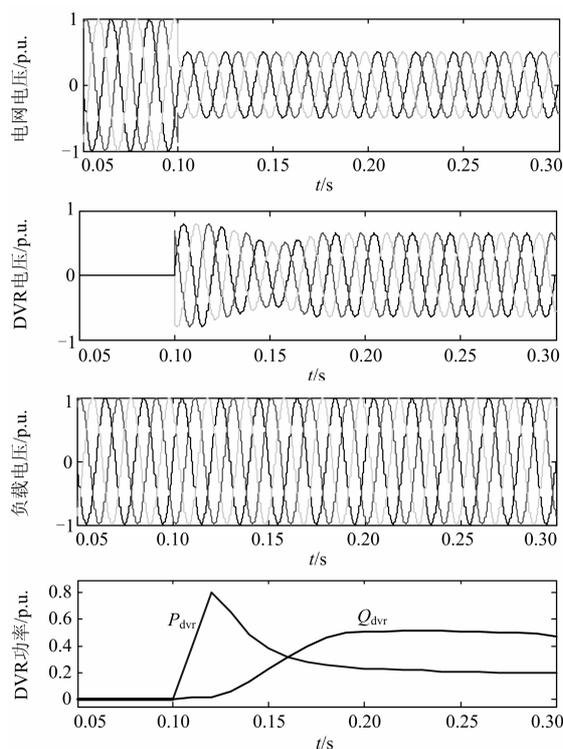


图 6 50%凹陷深度仿真结果

Fig. 6 Simulation results for 50% sag depth

5 结论

为治理电网中的电能质量问题, 避免其敏感负荷受电压跌落的影响, 本文将 DVR 引入其中并对其补偿策略进行了研究, 提出了优化综合补偿策略。在电压跌落初期采用跌落前补偿, 准确检测相角跳变, 实现电压幅值与相角的完全补偿, 两个周期后过渡到最小能量补偿, 采用一定的转换坡度, 逐步旋转电压相位减小相位跳变对敏感负载的影响。当凹陷深度过大, DVR 的调制指数或直流电压接近极限时, 采用迭代循环控制避免超调变。本文的综合策略结合跌落前补偿及最小能量法的优点, 对不同特点的三相对称电压跌落有良好的补偿效果, 但对于三相不平衡电压跌落, 需建立更精准的数学模型进行研究。仿真结果表明, 该方法简单易行, 可实时准确补偿电压跌落幅值及相角, 扩大补偿范围,

减小了补偿过程中的能量消耗, 显著延长了补偿时间, 满足 DVR 快速准确投切的要求。

参考文献

- [1] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-14.
WANG Chengshan, LI Peng. Development and challenges of distributed generation, the micro-grid and smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 10-14.
- [2] 王成山, 王守相. 分布式发电供能系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 1-4.
WANG Chengshan, WANG Shouxiang. Study on some key problems related to distributed generation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 1-4.
- [3] HAO Zhenghang, YAO Zhiqing, LI Shaohua. The contribution of double-fed wind farms to transient voltage and damping of power grids[J]. Tehnicki Vjesnik, 2015, 22(1): 43-49.
- [4] KANIEWSKI J, FEDYCZAK Z, BENYSEK G AC voltage sag/swell compensator based on three-phase hybrid transformer with buck-boost matrix-reactance chopper[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(8): 3835-3846.
- [5] CASTILLA M, MIRET J, CAMACHO A, et al. Voltage support control strategies for static synchronous compensators under unbalanced voltage sags[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(2): 808-820.
- [6] KUMAR C, MISHRA M. A multifunctional DSTATCOM operating under stiff source[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(7): 3131-3136.
- [7] 王同勋, 薛禹胜, CHOI S S. 动态电压恢复器研究综述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(9): 101-107.
WANG Tongxun, XUE Yusheng, CHOI S S. Review of dynamic voltage restorer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(9): 101-107.
- [8] 刘颖英, 肖湘宁, 徐永海. 动态电压恢复器的能量稳定补偿特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 69-74.
LIU Yingying, XIAO Xiangning, XU Yonghai. Characteristics analysis on energy steady compensation for dynamic voltage restorer[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 69-74.
- [9] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.

- YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [10] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.
- YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.
- [11] 党存禄, 严鋈, 张晓英. 动态电压恢复器的时间优化补偿策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 11-16.
- DANG Cunlu, YAN Jun, ZHANG Xiaoying. Analysis of time optimal compensation strategy for dynamic voltage restorer[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 11-16.
- [12] 王晶, 徐爱亲, 翁国庆, 等. 动态电压恢复器控制策略研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 145-151.
- WANG Jing, XU Aiqin, WENG Guoqing, et al. A survey on control strategy of DVR[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 145-151.
- [13] 王晶, 徐玲玲, 王志琦. 改进型动态电压恢复器的最小能量法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 73-78.
- WANG Jing, XU Lingling, WANG Zhiqi. Advanced dynamic voltage restorer with minimal energy control[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 73-78.
- [14] 肖湘宁, 徐永海, 刘连光. 考虑相位跳变的电压凹陷动态补偿控制器研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 64-69.
- XIAO Xiangning, XU Yonghai, LIU Lianguang. Research on mitigation methods of voltage sag with phase-angle jump[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 64-69.
- [15] MEYER C, DONCKER R W, LI Y W, et al. Optimized control strategy for a medium-voltage DVR — theoretical investigations and experimental results[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(6): 2746-2754.
- [16] 师维, 周卫平, 吴正国. 动态电压恢复器基于模糊形态滤波器的检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 63-68.
- SHI Wei, ZHOU Weiping, WU Zhengguo. A novel fuzzy morphology filter detection algorithm for dynamic voltage restorer[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 63-68.
- [17] 陈琦, 熊良根, 刘述军, 等. 基于双 dq 变换软件锁相的动态电压恢复器研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 87-93.
- CHEN Qi, XIONG Lianggen, LIU Shujun, et al. Research of dynamic voltage restorer based on double dq synchronous software phase-locked loop[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 87-93.
- [18] 毛涛, 乐健, 黄银龙, 等. 基于实时监测数据校验的配电系统电压跌落仿真系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 122-127.
- MAO Tao, LE Jian, HUANG Yinlong, et al. Research on simulation system of voltage sag in distribution system based on real-time monitoring data verification[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 122-127.

收稿日期: 2015-09-16; 修回日期: 2015-12-24

作者简介:

李正明(1958-), 男, 博士生导师, 教授, 主要研究方向为微电网及配电系统的保护与控制; E-mail: lzming@ujs.edu.cn

李文文(1990-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为微电网及配电系统的电能质量分析与控制; E-mail: likerong90@163.com

张国松(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源、光伏发电的研究。

(编辑 魏小丽)