

DVR 的不平衡浪涌和过电压控制

林智声¹, 戴宁怡¹, 黄民聪¹, 韩英铎^{1,2}

(1. 澳门大学电机及电子工程系, 澳门; 2. 清华大学电机系, 北京市 100084)

摘要: 讨论无串联隔离变压器的动态电压调节器(DVR)在不平衡电压浪涌或过电压情况下的补偿问题。使用不可控整流为直流侧电容充电的 DVR, 在补偿时只允许其向系统注入有功功率。在浪涌或过电压发生时, DVR 可能发生从系统吸收有功功率的情况, 如果仍然使用传统的同相或相位不变电压注入控制方法, 将导致直流侧电容电压迅速升高, 可能损坏开关器件或储能单元。利用最小能量补偿控制方法也不能完全解决该问题, 因而提出一种单向功率流动控制算法。该算法通过将参考电压旋转一定的角度, 使 DVR 无论在 3 相平衡与不平衡浪涌或过电压的情况下, 都不从配电系统吸收有功, 同时能将负荷电压补偿为 3 相平衡且达到正弦的额定值。该算法加入对 DVR 最大补偿极限的考虑, 以确保注入补偿电压不超过 DVR 的补偿极限。文中对直流母线电压不可避免的泵升问题提出了缓冲控制策略。最后, 仿真结果验证了算法的正确性及有效性。

关键词: 动态电压调节器; 电压浪涌; 过电压; 有功功率

中图分类号: TM761.1

0 引言

随着现代科学技术的发展, 电压敏感负荷日益增加。不同形式的电压质量问题, 如电压跌落、不平衡、长时间浪涌等, 有可能导致生产、工业、数据处理等过程完全崩溃, 从而给电力用户造成巨大的经济和数据损失^[1,2]。串联动态电压调节器(DVR——dynamic voltage restorer)是一个基于电力电子变流器的电压补偿装置, 它通过对电网系统注入补偿电压, 消除电网上的电压扰动, 起到保护电压敏感负荷的作用^[3,4]。

当 DVR 被应用在低电压等级的配电网中, 无串联隔离变压器的 DVR 比传统的有隔离变压器的 DVR 有更多优势。它可以消除串联变压器所带来的附加相移与电压降、谐波损耗、庞大的尺寸、昂贵的成本以及变压器磁化现象所造成的饱和、冲击电流等问题^[5]。不过, 无串联隔离变压器的 DVR 必须采用 3 个单相 H 桥逆变器与 3 个独立储能单元的结构。如果采用共享直流母线连接方式, 当 DVR 投入运行并触发开关器件时, 将会产生 3 相节点短路问题。DVR 直流母线通常有 2 种结构: 一种是直接由储能组件(如电池、电容)构成, 但其成本往往较昂贵; 为了节省成本, 可以采用另一种结构, 即不控整流滤波电路构成的直流母线, 它可以减少直流侧电压的纹波, 降低储能单元成本。与可控整流电路

相比, 不控整流电路成本较低, 不需要额外的控制电路。但是不控整流会产生较低次的高次谐波电流注入电网, 既会影响 DVR 的补偿效果也会降低负荷的电压质量。可以采用特殊结构的隔离变压器, 如 6 绕组变压器, 原边 3 相, 副边每相 6 个绕组, 分别接成三角形和星形, 接在 2 个 3 相整流电路之前, 最后再串接, 给直流侧电容充电, 这样可以使整流变压器原边电流谐波减小。但不控整流结构只允许有功功率从系统向逆变器单方向流动, 在可能发生能量反向流动的情况下(如系统电压发生凸起或浪涌), 利用同相或相位不变电压注入法将导致直流母线电压升高, 使 DVR 不能稳定运行, 严重的会损坏开关器件或储能组件, 因此抑制能量反向流动是采用该结构需要解决的重要问题。

文献[1,6]分别讨论了 3 相最小能量的补偿控制和它的改进方式, 但旨在使补偿电压凹陷时的 3 相注入总有功功率最小。文献[7,8]也讨论了运用最小能量的概念控制能防止能量反向流动的问题。但在补偿不平衡浪涌和过电压故障的情况下, 旋转正序分量的最小能量注入法仍有可能使 DVR 单相甚至 2 相存在吸收有功功率的机会, 令其直流电容电压泵升, 并危害储能电容器和开关器件的运行安全。基于这个原因, 本文将重点解决在不平衡浪涌和过电压情况下, DVR 补偿中的能量反向流动问题。因实际电力系统中的负荷大多数都为感性, 所以下文只针对感性负荷进行讨论分析。

1 单向功率流动控制算法

1.1 补偿极限下的 3 相参考电压旋转补偿角度

假设 3 相系统电压当发生不平衡浪涌或过电压时伴随着相移与不平衡现象, 3 相参考电压旋转补偿的角度可通过 3 个单相浪涌或过电压旋转电压补偿的相量图来计算。图 1 所示为单相浪涌或过电压时旋转电压补偿的相量图, 以下分析只考虑基频正序分量, 下标“1”表示基频成分, 下标 $i = a, b, c$ 。

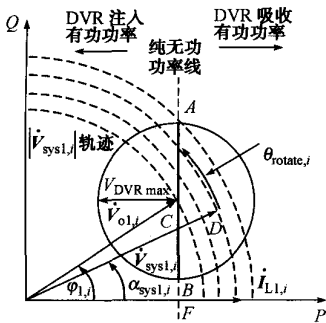


图 1 单相浪涌或过电压时旋转电压补偿的相量图
Fig. 1 Phasor diagram of single-phase rotate compensation during swell or overvoltage

若只关心 DVR 补偿后负荷电压的幅值 $|\dot{V}_{ol,i}|$, 负荷电压的轨迹可用图 1 所示的半径为 $|\dot{V}_{ol,i}|$ 的同心圆弧表示。圆周上不同的点就表示了补偿后负荷电压的不同相位。假设负荷相角 $\varphi_{1,i}$ 在浪涌或过电压期间不发生变化, 以逆时针旋转为正方向, 顺时针旋转为负方向。由于顺时针旋转负荷电压相量 $\dot{V}_{ol,i}$ 相当于逆时针旋转系统输入电压相量 $\dot{V}_{sysl,i}$, 反之亦然, 为了方便计算, 将负荷输出电压相量 $\dot{V}_{ol,i}$ 的旋转转化为系统输入电压相量 $\dot{V}_{sysl,i}$ 的旋转, 而负荷输出电压相量 $\dot{V}_{ol,i}$ 则转化为一个静止不变的相量^[7]。而负荷电流的相量 $\dot{I}_{Ll,i}$ 是由负荷电压相量 $\dot{V}_{ol,i}$ 决定的, 所以它也是一个静止的相量。如图 1 所示, 把负荷电流相量 $\dot{I}_{Ll,i}$ 的方向设置为有功功率参考轴, 垂直它的线段 AB 即可被定义为纯无功功率线, 这根线把 DVR 的工作域分为有功功率注入和有过功率吸收 2 个部分。

当系统输入电压幅值 $|\dot{V}_{sysl,i}|$ 比负荷电压幅值 $|\dot{V}_{ol,i}|$ 大, 且 DVR 在吸收有功功率时, 由原先系统浪涌电压相量 $\dot{V}_{sysl,i}$ 位置转移到零有功功率吸收情况的单相旋转角度 $\theta_{rotate,i}$ 是:

$$\theta_{rotate,i} = \arccos\left(\frac{|\dot{V}_{ol,i}| \cos \varphi_{1,i}}{|\dot{V}_{sysl,i}|}\right) - \alpha_{sysl,i} \quad (1)$$

$$\theta_{rotate,i} = \arccos\left(\frac{|\dot{V}_{ol,i}| \cos \varphi_{1,i}}{|\dot{V}_{sysl,i}|}\right) - \varphi_{1,i} \quad (2)$$

式中: $\alpha_{sysl,i}$ 表示系统电压 $\dot{V}_{sysl,i}$ 和负荷电流 $\dot{I}_{Ll,i}$ 的相角差。

若旋转前 DVR 是采用相位不变电压注入法, 则用式(1); 而采用同相电压注入法时则用式(2)。

当 DVR 的其中 1 相、2 相甚至全部 3 相的系统电压相量位于有功功率吸收区域时, 3 个单相可旋转的角度分别是 $\theta_{rotate,a}$, $\theta_{rotate,b}$ 和 $\theta_{rotate,c}$, 它们都可用式(1)或式(2)计算出来。为了避免 3 个直流储能电容器同时吸收有功功率, 3 相共同旋转角度 θ_{rotate} 可用式(3)来确定:

$$\theta_{rotate} = \max(\theta_{rotate,a}, \theta_{rotate,b}, \theta_{rotate,c}) \quad (3)$$

因为共同旋转角度 θ_{rotate} 是从 3 相中选择最大的可旋转角度, 这保证至少有 1 相系统电压相量将位于纯无功功率线上, 而其他 2 相则会落在有功功率注入区域内(如果它们不超过以补偿极限 V_{DVRmax} 为半径画出来的圆)。如果按逆时针方向旋转, 3 相系统电压旋转角度 $\theta_{r,system} = \theta_{rotate}$; 反之, 如果按顺时针方向旋转, 则 $\theta_{r,system} = -\theta_{rotate}$ 。

但是 3 相系统电压旋转角度 $\theta_{r,system}$ 是受到 DVR 补偿极限 V_{DVRmax} 所限制的。因此在计算旋转角度时, DVR 的补偿极限也应被考虑在内。引用文献[7]中提出的 3 相参考电压旋转极限的补偿算法, 就能考虑分析补偿极限对旋转角度的影响。设 θ_1 和 θ_2 分别表示 3 相系统电压可以向顺时针或逆时针方向旋转的极限角度^[7]:

情况 1: $\theta_1 \leq \theta_{r,system} \leq \theta_2$ 。如果补偿电压浪涌或过电压旋转角度正好落在补偿极限确定的角度范围之内, 则可以直接选用 $\theta_{r,system}$ 作为最终旋转的角度。

情况 2: $\theta_{r,system} > \theta_2$ 或 $\theta_{r,system} < \theta_1$, 表示需要向逆时针或顺时针方向旋转更多的角度以满足补偿电压浪涌或过电压的目标。由于受到补偿极限 θ_1, θ_2 的限制, 所以只能分别选取 θ_1 或 θ_2 作为旋转角度补偿的折衷方案。

之前为了方便计算, 所以把负荷输出电压相量 $\dot{V}_{ol,i}$ 的旋转转化为系统浪涌电压相量 $\dot{V}_{sysl,i}$ 的旋转。实际系统浪涌电压相量 $\dot{V}_{sysl,i}$ 才是一个静止的相量, 负荷电压的旋转是通过改变 DVR 注入补偿电压的相位, 而注入补偿电压的相位改变是通过旋转参考负荷电压的角度来实现的, 所以最终 3 相参考负荷电压旋转的角度为:

$$\theta_{r,ref} = -\theta_{r,system} \quad (4)$$

旋转 3 相参考负荷电压的角度并不会改变对系统电压负序、零序和谐波分量的补偿。它只改变 DVR 补偿电压正序的幅值和角度, 而系统电压负序、零序和谐波分量的补偿则是通过平衡及正弦的

参考负荷电压来消除的。

不过,瞬时相位角的实时旋转将有可能引起负荷电压波形间断和负荷功率波动,这可能对电压相位敏感负荷产生极大的影响^[6,9]。渐进式的旋转方法能令负荷电压的相位旋转平稳过渡。而且当浪涌或过电压故障被清除后,渐进式的旋转也能被应用于恢复 3 相负荷电压在浪涌或过电压前的原本相位。如不考虑这点,虽然配电网的故障已经消除,系统侧电压与负荷电压之间的相移仍使 DVR 把电压和有功功率注入系统中。在整个渐进式旋转的过程中,负荷电压的相位都以恒定的步长变化,但步长的大小则是根据敏感负荷能承受的电压相位变化而定^[6]。因为本文只着重于解决浪涌和过电压补偿的能量反向流动问题,所以渐进式旋转角度的内容将不进行详细讨论。

虽然提出的单向功率流动控制算法能抑制直流储能电容器的电压升高,并且使功率只能从直流储能电容器到配电网单向流动,但该方法仍受一些因素限制,在 DVR 不满足这些制约条件时,直流母线电压将不可避免地持续上升。以下将对这些限制进行讨论分析。

1.2 单向功率流动控制算法的限制

1.2.1 能量吸收和直流电压泵升的对应关系

在每相直流电容中,一个恒定的电压代表电容储存了恒定的能量;假如储存的能量增大或减少,直流电压也会相对地升高或降低,其中能量是电容吸收功率的积分:

$$\epsilon(t) = \int_{t_0}^t P_{dc} dt + \epsilon_0 \quad (5)$$

式中: ϵ_0 为电容初始储存的能量。

如果直流电容吸收功率 P_{dc} 在 $(t-t_0)$ 时段的积分大于 0,电容内储存的能量 $\epsilon(t)$ 便会增加。能量增加会令直流电压升高。电压与能量的关系为:

$$\int_{t_0}^t P_{dc}(\tau) d\tau = \frac{C_{dc}}{2} [v_{dc}^2(t) - v_{dc0}^2] \quad (6)$$

$$\epsilon(t) = \int_{t_0}^t P_{dc}(\tau) d\tau + \epsilon_0 = \frac{C_{dc}}{2} v_{dc}^2(t) \quad (7)$$

式中: $\epsilon_0 = C_{dc} v_{dc0}^2 / 2$, v_{dc0} 为直流储能电容器初始的电压值; $v_{dc}(t)$ 为储能电容器在吸收浪涌或过电压能量后的电压值; C_{dc} 为直流储能电容量。

1.2.2 直流母线电压不可避免的泵升

当发生较大能量的浪涌或过电压时,因控制系统采样、计算及最终完成控制需要时间,同时为了避免负荷电压的相位跳变,注入电压相位必须渐进地旋转,这样 DVR 发生短时间的有功功率吸收是不可避免的,因此直流母线电压不同程度的泵升也会发生。设 $v_{dc,max}$ 为电容允许的最大电压值,由式(6)可见,如果

$$\int_{t_0}^t P_{dc}(\tau) d\tau > \frac{C_{dc}}{2} (v_{dc,max}^2 - v_{dc0}^2) \quad (8)$$

直流母线电压过高将损坏储能电容器及危害开关器件。因此,当设计 DVR 系统参数时应该留有余地,直流储能电容量应留有冗余。

当储能电容器吸收过多能量时,将有可能发生电容电压大于其允许最大电压值的情况。在这种情况下,可以考虑增加与储能电容器并联的电池或电阻,使得多出部分的能量释放到电池或电阻上,从而抑制直流母线电压的过度泵升。但是采用电池将增加成本,而采用电阻放电将增加损耗、减低系统效率,所以它们都不是优先选择的缓冲方案。

考虑到采用单向功率流动控制算法抑制直流电压泵升是有制约因素的,除了 DVR 最大注入电压幅值限制外,还有器件参数的限制等。在 DVR 不满足这些制约条件时,直流母线电压将不可避免地持续上升。通过本文提出的单向功率流动控制算法并考虑其补偿极限,若直流母线电压泵升的程度仍然可能会损坏储能电容器及危害开关器件,这时也可以考虑运用上面提及的缓冲控制策略去抑制直流母线电压过度泵升的问题。

1.3 单向功率流动控制算法的实现

根据以上的分析结果,本文提出的单向功率流动控制算法的控制框图如图 2 所示。

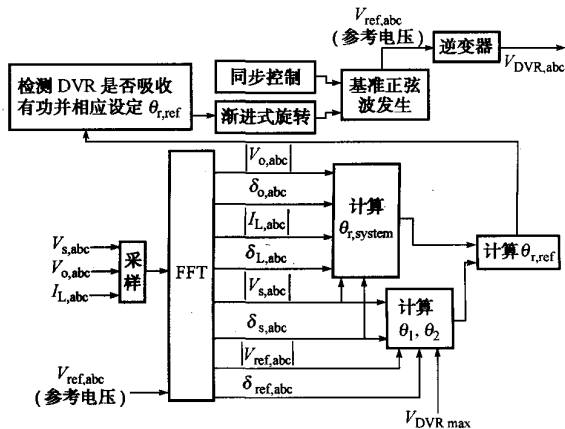


图 2 单向功率流动控制算法的控制框图

Fig. 2 Control block diagram for unidirectional power flow control algorithm

从图 2 的控制算法框图中可以看出,系统电压、负载输出电压、负载电流和参考电压的幅值和相角都是利用 FFT 计算出来的。若 DVR 不吸收有功,则不对 3 相参考负荷电压做出任何的旋转,即 $\theta_{r,ref} = 0$,或对故障时已旋转的角度做反方向旋转,从而恢复 3 相负载输出电压的原本相位。相反,只要 DVR 其中 1 相被检测到在吸收有功,参考负荷电压就需要做出旋转。经过计算 3 相所需旋转角度

$\theta_{r,system}$ 和其补偿极限所允许的旋转范围 θ_1 和 θ_2 后, 就能判定最终参考负荷电压的旋转角度 $\theta_{r,ref}$ 。然后运用渐进式的旋转方法, 慢慢地以恒定的步长旋转 3 相参考负荷电压的角度, 从而改变 DVR 注入配电系统电压的幅值和角度, 使 DVR 不再吸收有功。当浪涌或过电压故障被清除后, 若 DVR 不吸收有功功率, 参考负荷电压将对故障时已旋转的角度做反方向旋转, 从而恢复浪涌或过电压前 3 相负载输出电压的原本相位。

2 仿真结果

利用电力系统仿真软件 PSCAD/EMTDC 进行仿真, 把传统最小能量注入补偿方法与本文提出的单向功率流动控制算法进行比较研究。在仿真过程中, 所使用的模拟 110 V/5 kVA DVR 的系统参数如下: 相电压 V_{phase} 为 110 V(rms)/50 Hz; 滤波电感 L 为 7.6 mH; 滤波电容 C 为 11 μ F; 开关频率 f_{sw} 为 10 kHz; 直流储能电容器为 1 650 μ F/900 V; 负载纯电阻为 30 Ω ; 渐进式旋转速度为 1.745 rad/s。

仿真中, 设 3 相负载功率因数等于 1, a 相系统电压在 0.2 s 出现浪涌(142 V(rms)), 持续 0.8 s, 而其余 2 相电压保持不变, 分别采用传统最小能量和本文所提出的单向功率流动控制算法进行补偿, 仿真结果如图 3 和图 4 所示。

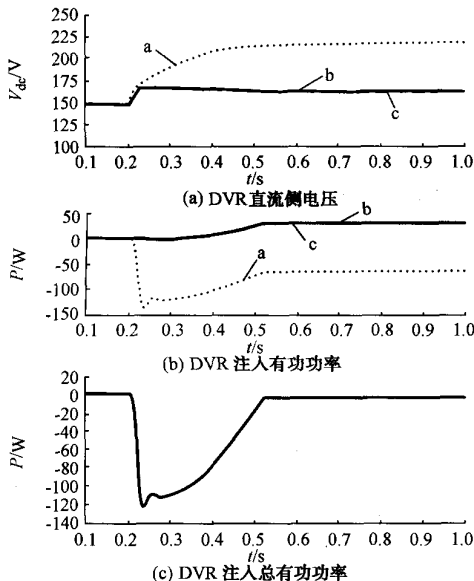


图 3 传统最小能量注入法

Fig. 3 Traditional minimum energy injection scheme

图 3 为采用最小能量注入法的补偿情况, 由于传统最小能量补偿方法是抽出正序电压来计算 3 相总最小能量注入或吸收的旋转角度, 浪涌不平衡将

有可能令 1 相或 2 相停留在有功功率吸收区域内。

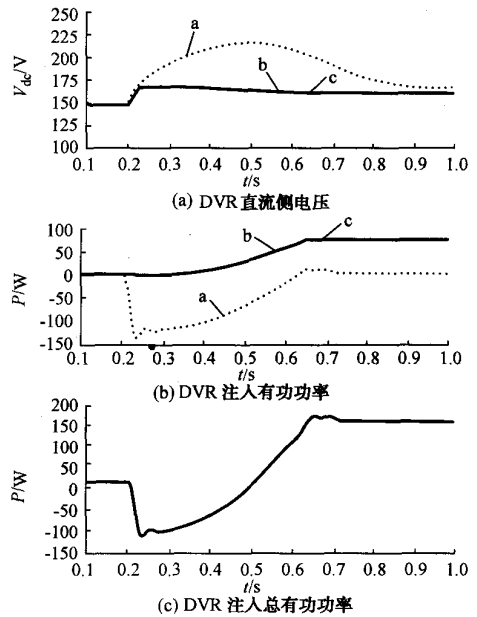


图 4 本文单向功率流动控制算法

Fig. 4 Proposed unidirectional power flow control algorithm

图 3 是解释这种特殊情况的好例子。即使在 0.52 s 后 DVR 总注入有功功率等于 0, a 相仍在吸收 62.5 W 的有功功率, 这是因为 b 相和 c 相在这阶段正把有功功率注入到系统中。图 3 却显示 a 相直流侧电压在浪涌期间仍持续泵升。因此, 当发生不平衡电压浪涌时, 传统最小能量注入法不能有效解决直流侧电容器过度泵升的问题。

如果利用本文所提出的单向功率流动控制算法进行电压浪涌补偿, 如图 4 所示, DVR 总注入有功功率和 3 相注入有功功率曲线分别渐进地从总注入功率 $P_{inj} < 0$ 和单相注入 $P_{injs} < 0$ 回升到大于 0, 从而保证了直流储能电容器不吸收有功功率。因此可清楚看出, 在 0.56 s 后, a 相直流侧电压曲线将逐渐向下回落, 从而避免了储能电容器出现过电压问题, 而且 3 相负荷能输出电压平衡。

3 结语

具有不可控整流无串联隔离变压器的 DVR 在补偿电压浪涌或过电压时, 直流侧电压不断升高会给直流储能电容器和开关器件带来灾难性的影响。运用传统的最小能量补偿控制方法也不能完全解决这个问题。为了避免直流侧电压超越安全工作电压范围, 本文提出了一种单向功率流动控制算法, 并在该算法中考虑了 DVR 最大补偿极限对可旋转角度

的影响,使注入电压同时满足不超过最大补偿极限的条件。这个算法可以解决平衡与不平衡电压浪涌或过电压发生时 DVR 的能量反向流动问题,并且能将负荷电压补偿为平衡和正弦的额定值。本文还提出在直流母线电压不可避免泵升的情况下的附加缓冲控制策略。本文最后给出了仿真研究的结果。通过与传统的最小能量注入法的比较,证明对于使用 3 相独立逆变器的 DVR,本文所提出的单向功率流动控制算法可补偿不平衡浪涌或过电压问题,而且优于最小能量注入补偿法。

感谢澳门大学研究委员会及清华大学柔性输配电研究所给予的帮助和支持!

参考文献

- [1] VILATHGAMUWA D M, PERERA A A D R, CHOI S S. Voltage Sag Compensation with Energy Optimized Dynamic Voltage Restorer. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2003, 18(3): 928—936.
- [2] VILATHGAMUWA D M, PERERA A A D R, CHOI S S et al. Control of Energy Optimized Dynamic Voltage Restorer. In: *Proceedings of the 25th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. San Jose (CA, USA): 1999. 873—878.
- [3] GHOSH A, LEDWICH G. Compensation of Distribution System Voltage Using DVR. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2002, 17(4): 1030—1036.
- [4] LAM C S, WONG M C, HAN Y D. Stability Study on Dynamic Voltage Restorer (DVR). In: *Proceedings of IEEE First International Conference on Power Electronics Systems and Applications*. Hong Kong(China): 2004. 66—71.
- [5] LI B H, CHOI S S, VILATHGAMUWA D M. Transformerless Dynamic Voltage Restorer. *IEE Proceedings—Generation, Transmission and Distribution*, 2002, 149(3): 263—273.
- [6] 袁川,杨洪耕.动态电压恢复器的改进最小能量控制. *电力系统自动化*, 2004, 28(21): 49—53.
YUAN Chuan, YANG Hong-geng. Advanced Minimum-energy Control of Dynamic Voltage Restorer. *Automation of Electric Power Systems*, 2004, 28(21): 49—53.
- [7] 张秀娟,杨潮,唐志,等.串联型电能质量控制器注入电压的研究. *中国电机工程学报*, 2003, 23(2): 15—20.
ZHANG Xiu-juan, YANG Chao, TANG Zhi et al. The Voltage Injection Analysis in Series Power Quality Controller. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(2): 15—20.
- [8] 刘昊,韩民晓,尤勇,等.线电压补偿型 DVR 的补偿能力分析. *电力系统自动化*, 2003, 27(21): 54—57.
LIU Hao, HAN Min-xiao, YOU Yong et al. Analysis of Compensation Capability of Line Voltage Compensation Based on Dynamic Voltage Recovery (DVR). *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(21): 54—57.
- [9] CHOI S S, LI B H, VILATHGAMUWA D M. Dynamic Voltage Restoration with Minimum Energy Injection. *IEEE Trans on Power Systems*, 2000, 15(1): 51—57.

林智声(1980—),男,硕士研究生,主要从事电力电子与电能质量补偿方面的研究工作。E-mail: ma36576@wkg.umac.mo

戴宁怡(1979—),女,博士研究生,主要从事电力电子与电能质量补偿方面的研究工作。

黄民聪(1969—),男,博士,助理教授,主要从事电力电子、电能质量补偿以及 FACTS 与 DFACTS 的研究工作。

Unbalanced Voltage Swell and Over-voltage Control in Dynamic Voltage Restorer

LAM C S¹, DAI Ning-yi¹, WONG M C¹, HAN Ying-duo^{1,2}

(1. University of Macau, Macau, China; 2. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The unbalanced voltage swell and over-voltage compensation problems in a transformerless dynamic voltage restorer (DVR) are discussed. Installation of a diode rectifier circuit for charging the DC-link storage capacitor only allows DVR to inject active power to distribution system during compensation. When swells or over-voltages happen, it's possible for the DVR to absorb active power from the system side. Applying in-phase or phase-invariant voltage injection control scheme will cause the DC-link voltage level to rise rapidly, and excess rise of the DC-link voltage will damage the storage capacitor or switching devices (IGBTs). Applications of minimum energy compensation scheme still cannot solve the DC-link voltage rise problem during unbalanced situation. A novel unidirectional power flow control algorithm is proposed in this paper. By rotating the reference load output voltage a certain angle, DVR three-phase does not absorb active power from the distribution system under either balanced/unbalanced swell and over-voltage situations, and the compensated load output voltage is a balanced and sinusoidal nominal value. The maximum DVR compensation limit has also been considered inside the control algorithm, so that the injected voltage does not exceed its compensation limit. An additional alleviating control strategy for solving the unavoidable DC-link voltage rise situation is also proposed. Finally, simulation results are presented to prove the validity and effectiveness of the proposed control algorithm.

Key words: dynamic voltage restorer (DVR); voltage swell; over-voltage; active power

DVR的不平衡浪涌和过电压控制

作者: [林智声](#), [戴宁怡](#), [黄民聪](#), [韩英铎](#), [LIN Zhi-sheng](#), [DAI Ning-yi](#), [HUANG Min-cong](#),
[HAN Ying-duo](#)

作者单位: [林智声,戴宁怡,黄民聪,LIN Zhi-sheng,DAI Ning-yi,HUANG Min-cong\(澳门大学电机及电子工程系,澳门\)](#), [韩英铎,HAN Ying-duo\(澳门大学电机及电子工程系,澳门;清华大学电机系,北京市,100084\)](#)

刊名: [电力系统自动化](#) 

英文刊名: [AUTOMATION OF ELECTRIC POWER SYSTEMS](#)

年,卷(期): 2005,29(20)

被引用次数: 7次

参考文献(9条)

- [VILATHGAMUWA D M;PERERA A A D R;CHOI S S](#) [Voltage Sag Compensation with Energy Optimized Dynamic Voltage Restorer](#)[外文期刊] 2003(03)
- [VILATHGAMUWA D M;PERERA A A D R;CHOI S S](#) [Control of Energy Optimized Dynamic Voltage Restorer](#)[外文会议] 1999
- [GHOSH A;LEDWICH G](#) [Compensation of Distribution System Voltage Using DVR](#)[外文期刊] 2002(04)
- [LAM C S;WONG M C;HAN Y D](#) [Stability Study on Dynamic Voltage Restorer \(DVR\)](#) 2004
- [LI B H;CHOI S S;VILATHGAMUWA D M](#) [Transformerless Dynamic Voltage Restorer](#)[外文期刊] 2002(03)
- 袁川;杨洪耕 [动态电压恢复器的改进最小能量控制](#)[期刊论文]-[电力系统自动化](#) 2004(21)
- 张秀娟;杨潮;唐志 [串联型电能质量控制器注入电压的研究](#)[期刊论文]-[中国电机工程学报](#) 2003(02)
- 刘吴;韩民晓;尤勇 [线电压补偿型DVR的补偿能力分析](#)[期刊论文]-[电力系统自动化](#) 2003(21)
- [CHOI S S;LIB H;VILATHGAMUWA D M](#) [Dynamic Voltage Restoration with Minimum Energy Injection](#)[外文期刊] 2000(01)

本文读者也读过(10条)

- [韩利](#), [温旭辉](#), [文辉清](#), [HAN Li](#), [WEN Xu-hui](#), [WEN Hui-qing](#) [VSI直流母线浪涌电压的软件抑制策略研究](#)[期刊论文]-[电力电子技术](#)2007, 41(10)
- [张昌银](#), [李建胜](#), [尹忠东](#) [动态电压调节器\(DVR\)在电力系统中的应用研究](#)[期刊论文]-[电气应用](#)2007, 26(1)
- [王成亮](#) [大型发电机轴电压研究现状及展望](#)[会议论文]-2008
- [魏德军](#) [直流接地极对地下金属设施的电腐蚀影响](#)[会议论文]-2007
- [高维忠](#), [张宗萍](#), [吴博](#), [梁晟](#), [GAO Wei-zhong](#), [ZHANG Zong-ping](#), [WU Bo](#), [LIANG Cheng](#) [河南电网ADSS光缆电腐蚀防护](#)[期刊论文]-[电力系统通信](#)2008, 29(6)
- [王巨丰](#), [杨文斌](#), [赵权](#), [WANG Ju-feng](#), [YANG Wen-bin](#), [ZHAO Quan](#) [雷电流流过地线时控制电缆感应电压的研究](#)[期刊论文]-[广西电力](#)2006, 29(1)
- [尹忠东](#), [张卫华](#), [韩民晓](#) [动态电压恢复器注入变压器过饱和和抑制](#)[期刊论文]-[电力系统自动化](#)2004, 28(24)
- [刘庆雪](#), [李敏远](#), [LIU Qing-xue](#), [LI Min-yuan](#) [串联谐振逆变器死区对浪涌电压电流的影响](#)[期刊论文]-[工业加热](#) 2005, 34(6)
- [周静](#), [韦统振](#), [赵艳雷](#), [齐智平](#), [ZHOU Jing](#), [WEI Tongzhen](#), [ZHAO Yanlei](#), [QI Zhiping](#) [低压配电网中单相动态电压恢复器与电力系统之间的能量流动](#)[期刊论文]-[电力自动化设备](#)2010, 30(4)
- [石月春](#), [唐新文](#), [徐力明](#), [张再虎](#), [SHI Yue-chun](#), [TANG Xin-wen](#), [XU Li-ming](#), [ZHANG Zai-hu](#) [电厂220 kV断路器内部电腐蚀问题的分析及处理](#)[期刊论文]-[高压电器](#)2006, 42(1)

引证文献(7条)

1. [朱俊星](#), [王同勋](#), [肖勇](#) [基于飞轮储能的动态电压恢复器补偿电压暂升的研究](#)[期刊论文]-[科技资讯](#) 2010(1)
2. [周晖](#), [齐智平](#), [何旻](#), [韦统振](#) [单相DVR快速电压补偿控制的实现](#)[期刊论文]-[电力系统自动化](#) 2007(6)
3. [刘海春](#), [徐立智](#), [谢少军](#) [中频动态电压恢复器研究](#)[期刊论文]-[电力自动化设备](#) 2010(3)
4. [张纪旭](#), [肖国春](#), [陈北海](#), [胡志亮](#), [王兆安](#) [移相控制技术在串联有源电压质量调节器中的应用](#)[期刊论文]-[电工技术学报](#) 2009(2)
5. [肖国春](#), [南长合](#), [胡志亮](#), [王兆安](#) [一种串联有源电压质量调节器的移相控制技术](#)[期刊论文]-[中国电机工程学报](#) 2008(4)
6. [周雪松](#), [何杰](#), [马幼捷](#), [张智勇](#) [动态电压恢复器主电路拓扑和控制算法的研究](#)[期刊论文]-[高电压技术](#) 2008(4)
7. [王同勋](#), [薛禹胜](#), [S. S. CHOI](#) [动态电压恢复器研究综述](#)[期刊论文]-[电力系统自动化](#) 2007(9)

引用本文格式: [林智声](#), [戴宁怡](#), [黄民聪](#), [韩英铎](#), [LIN Zhi-sheng](#), [DAI Ning-yi](#), [HUANG Min-cong](#), [HAN Ying-duo](#) [DVR的不平衡浪涌和过电压控制](#)[期刊论文]-[电力系统自动化](#) 2005(20)