

直流配电网多变流器纹波谐振问题研究

王 宁¹,袁 杰¹,焦晋荣¹,贾清泉¹,石磊磊^{1,2}

(1. 燕山大学 电力电子节能与传动控制河北省重点实验室,河北 秦皇岛 066004;

2. 国网河北省电力公司邢台供电分公司,河北 邢台 054001)

摘要:纹波是直流配电网中一种典型的电能质量问题。纹波谐振不仅影响直流配电网的电能质量,还会危及系统的安全稳定运行。探究了纹波在直流侧网络结构中的谐振现象;对接入端交流侧出现电压畸变和三相不平衡等情况引起的纹波从机理上进行了分析;建立了含变流器的直流配电网的等效电路,推导了变流器接入个数及接入位置对纹波谐振的影响关系;考虑各变流器间的耦合作用,推导了各变流器之间的耦合系数,研究了耦合作用对纹波谐振的影响。仿真结果验证了理论分析和所建模型的正确性。

关键词:直流配电网;电能质量;多变流器;纹波谐振;耦合作用

中图分类号: TM 727

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.07.012

0 引言

随着新能源发电的开发利用和新型用电方式的出现,越来越多的直流设备接入电网^[1-3]。为了适应这一转变,直流配电网的概念被提出^[4-7]。采用直流配电方式能够降低线路成本、提高供电可靠性^[8-11],节省分布式直流电源并入交流电网所需的逆变设备^[12],更好地发挥分布式电源的效益。数据中心、军舰、航空和自动化系统的直流区域配电,尤其是电力牵引直流供电技术已经成熟,为直流微电网的推广应用提供了良好的契机^[13]。但直流电网的电能质量问题是需要关注的重要方面之一^[14-16]。纹波是直流系统中存在的交流成分^[17-18],是一种较为普遍的直流电能质量问题。纹波谐振可能会造成保护误动,降低直流配电网的供电可靠性,严重的纹波放大问题不仅影响系统的电能质量,还会危害系统的安全稳定运行。直流配电网含有大量的变流器接入端,例如交流电网接入的 AC/DC 设备、新能源发电接入的 DC/DC 或 AC/DC 设备、交流负荷接入的 DC/AC 逆变设备等。一方面,这些接入端运行情况复杂,不能时刻保持恒定或理想状况,易成为直流配电网的纹波源;另一方面,多个接入端对直流配电网中纹波的影响并不独立,网络的阻抗特性会因接入端的不同而发生变化,导致多个接入端与电网之间的交互情况比单个接入端的情况更复杂。含多变流器的直流配电网中纹波谐振问题会受到接入端非理想情况或因接入端的不同而导致网络特性改变等多种因素

的影响。因此,合理配置变流设备的接入数量和接入位置,防止纹波在某一频率附近出现严重的放大现象,对直流配电技术的应用具有重要意义。

文献[13]将直流微电网的母线电压波动按其存在的时间尺度、产生的原因、波动的周期性和频率等因素分为扰动型电压波动和振荡型电压波动两大类,其中交流电网或负载不平衡、谐波导致的振荡型电压波动会引起纹波。文献[19]说明了逆变器的交流侧不平衡会造成直流电容电压波动,从而引起纹波。文献[20]分析了直流配电网中整流器交流出口处发生单相接地故障时的暂态过程,表明交流侧零序电压会使直流侧发生工频共模响应。关于交流电网的谐波谐振问题,文献[21]研究了逆变器经 LCL 型滤波器接入交流电网的谐波谐振现象,并采用逆变器阻抗重塑控制方法抑制谐波谐振;文献[22]提出了考虑非线性因素的逆变器建模方法,并基于多逆变器与电网构成的分布式阻抗网络模型分析谐波的交互现象。

目前,尚未有文献对直流系统中的纹波谐振问题进行分析。本文从直流配电网接入端交流侧出现电压畸变和不平衡等情况分析推导纹波的形成机理;建立含变流设备的直流配电网纹波阻抗模型,推导变流器的接入个数及接入位置对纹波谐振影响的关系式;分析多变流器间的耦合作用,根据网络方程得出不同变流设备间的耦合系数,研究耦合作用对纹波谐振的影响。仿真结果表明了理论分析和所建模型的正确性。

1 纹波形成机理分析

变流器开关函数的自身特性使其直流侧输出含有与载波频率及其倍频相关的高频纹波,其对直流侧造成的波动量很小且容易治理。交流接入端的非理想特性引起的纹波与开关函数引起的纹波相比,

收稿日期:2017-03-08;修回日期:2017-05-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51477147,51607153);河北省自然科学基金资助项目(E2016203268);河北省教育厅基金资助项目(QN2015124)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51477147,51607153),the Natural Science Foundation of Hebei Province(E2016203268) and the Foundation of Hebei Province Department of Education(QN2015124)

前者的纹波次数较低、波动幅值较大。故以下分析主要针对交流低频模型展开,不计与开关函数有关的高次纹波分量。

1.1 交流侧畸变引起的纹波分析

直流配电网中电力电子设备、非线性负荷的接入使得交流电源侧和交流负荷侧含有一定的谐波,这些接入端交流侧的畸变特性会给直流配电网注入纹波。设交流侧含有的 k 次三相谐波电流为:

$$\begin{cases} i_{Ak} = I_{Ak} \cos(k\omega t + \varphi_{Ak}) \\ i_{Bk} = I_{Bk} \cos[k(\omega t - 2\pi/3) + \varphi_{Bk}] \\ i_{Ck} = I_{Ck} \cos[k(\omega t + 2\pi/3) + \varphi_{Ck}] \end{cases} \quad (1)$$

其中, I_{Ak} 、 I_{Bk} 、 I_{Ck} 为三相谐波电流幅值; φ_{Ak} 、 φ_{Bk} 、 φ_{Ck} 为三相谐波电流相位。

变流器开关函数为:

$$S_x = \begin{cases} 1 & x \text{ 相上桥臂导通, 下桥臂关断} \\ -1 & x \text{ 相上桥臂关断, 下桥臂导通} \end{cases} \quad x = A, B, C \quad (2)$$

交直流两侧电流关系为:

$$i_{dc} = \frac{1}{2} (S_A i_A + S_B i_B + S_C i_C) \quad (3)$$

低频模型下, 开关函数为:

$$\begin{bmatrix} S_A \\ S_B \\ S_C \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, $F = U_{Nm}/U_c$ 为幅度调制比, U_{Nm} 为交流侧额定电压幅值, U_c 为载波电压幅值。

计算直流侧电流的波动量为:

$$\begin{aligned} \tilde{i}_{dc} = \frac{1}{4} F \{ & I_{Ak} \cos[(k-1)\omega t + \varphi_{Ak}] + \\ & I_{Ak} \cos[(k+1)\omega t + \varphi_{Ak}] + \\ & I_{Bk} \cos[(k-1)\omega t - (k-1)2\pi/3 + \varphi_{Bk}] + \\ & I_{Bk} \cos[(k+1)\omega t - (k+1)2\pi/3 + \varphi_{Bk}] + \\ & I_{Ck} \cos[(k-1)\omega t + (k-1)2\pi/3 + \varphi_{Ck}] + \\ & I_{Ck} \cos[(k+1)\omega t + (k+1)2\pi/3 + \varphi_{Ck}] \} \quad (5) \end{aligned}$$

由式(5)可见, 当接入端交流侧含有 k 次谐波电流时, 直流电流波动量中所含的频率为 $(k \pm 1)f$, f 为交流侧的工频。纹波的幅值与调制比和引起纹波的谐波电流幅值有关。

1.2 交流侧三相不平衡引起的纹波分析

电网运行中, 交流电源或交流负荷可能出现三相不平衡。采用对称分量法, 设由各序分量构成的 A 相电流表达式为:

$$i_A = I_{A(1)} \cos(\omega t - \varphi_{(1)}) + I_{A(2)} \cos(\omega t - \varphi_{(2)}) + I_{A(0)} \cos(\omega t - \varphi_{(0)}) \quad (6)$$

其中, $I_{A(1)}$ 和 $\varphi_{(1)}$ 分别为电流正序分量的幅值和相位; $I_{A(2)}$ 和 $\varphi_{(2)}$ 分别为电流负序分量的幅值和相位; $I_{A(0)}$ 和 $\varphi_{(0)}$ 分别为电流零序分量的幅值和相位。则有:

$$i_{dc} = \frac{1}{2} (S_A i_A + S_B i_B + S_C i_C) = \frac{3}{4} F I_{A(1)} \cos \varphi_{(1)} + \frac{3}{4} F I_{A(2)} \cos(2\omega t - \varphi_{(2)}) \quad (7)$$

可见, 当交流侧三相不平衡时, 直流侧电流除含有直流分量外, 还包括 2 倍工频分量。网络中的负序分量使功率出现波动, 且不平衡度越大, 引起的直流侧纹波幅值也越大。若考虑交流系统不平衡度一般小于 4%, 则纹波幅值也不会超过直流分量的 4%。

2 直流侧纹波谐振网络等效电路

变流设备直流侧输出的纹波电流经滤波电感和直流线路进入直流系统。纹波在直流侧的影响特性与该侧网络结构密切相关, 考虑直流侧各部分的电感、电容, 得到的等效电路如图 1 所示。图中, C 为直流侧支撑电容; L_p 和 L_n 分别为正极和负极线路的滤波电感; 直流线路的参数中包含对地电容和线路电感。

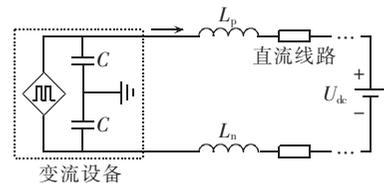


图 1 直流侧等效结构

Fig.1 Equivalent structure of DC side

由于直流配电网线路长度适中、电压等级不高, 可近似地将直流线路用集中参数表示, 得到总串联阻抗和总并联导纳。以正极线路为研究对象, 其等效电路如图 2 所示。图中, L_z 、 R_z 、 C_z 分别为集中参数表示的线路总电感、总电阻和并联电容; u_r 为变流器直流输出侧电压; u_{dc} 为直流系统侧电压; i_1 为变流器输出侧流入直流线路的电流; i_2 为直流线路等效串联分支上的电流; i_{Cz} 为流入直流线路等效并联分支的电流; i_g 为流入直流系统的电流。

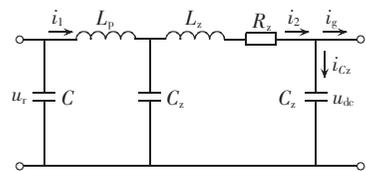


图 2 直流侧等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of DC side

由图 2 可知, 当网络中有与谐振频率相同的纹波源时, 易造成该纹波及其附近频率成分的放大。

以图 2 所示结构为例, 对单个变流设备接入直流配电网的情况进行定量分析, 流入直流系统的电流为:

$$I_g(s) = I_2(s) - I_{Cz}(s) = \frac{U_r(s)}{\Lambda} - \frac{(L_p C_z s^2 + 1) U_{dc}(s)}{\Lambda} - s C_z U_{dc}(s) = Y_r U_r(s) - Y_{dc} U_{dc}(s) \quad (8)$$

$$\begin{cases} \Lambda = L_p L_z C_z s^3 + L_p C_z R_z s^2 + (L_p + L_z) s + R_z \\ Y_r = 1/\Lambda \\ Y_{dc} = s C_z + (L_p C_z s^2 + 1)/\Lambda \end{cases} \quad (9)$$

由式(8)可知,线路参数影响网络阻抗特性。整体看来,含变流设备的直流网络为典型的二端口网络。根据图 2 和式(8),为建立与谐振问题相关的网络阻抗模型,将端口内部电路结构进一步简化为图 3。图中, $Z_1=1/Y_r$ 为等效串联阻抗; $Z_2=1/(Y_{dc}-Y_r)$ 为等效并联阻抗。

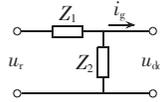


图 3 直流侧等效简化电路
Fig.3 Simplified equivalent circuit of DC side

该等效电路即为单个变流器接入直流配电网的模型。

3 多变流器接入直流配电网纹波谐振分析模型

若网络中有 n 个变流设备同时连接在直流线路上,其网络拓扑如图 4 所示。图中, $Z_{1i}, Z_{2i}(i=1, 2, \dots, n)$ 分别为第 i 个设备的等效串联阻抗和等效并联阻抗。假设直流系统本身不含纹波,系统阻抗用 Z_s 表示。

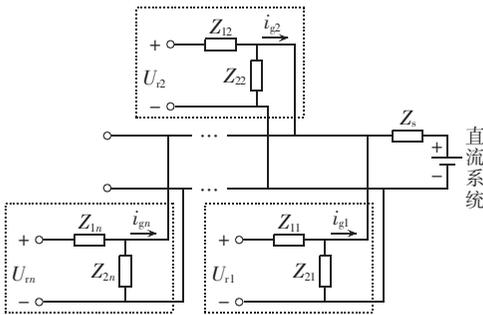


图 4 多变流器接入的等效简化网络
Fig.4 Simplified equivalent network with multiple converters

3.1 变流器接入个数对纹波谐振的影响

当多个变流设备在同一位置接入,输出电流 i_{gi} 和直流侧电压 u_{ri} 之间有如下关系:

$$\begin{bmatrix} I_{g1} \\ I_{g2} \\ \vdots \\ I_{gn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{r1} \\ U_{r2} \\ \vdots \\ U_{rn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

在同一位置接入时,设各变流器参数相同, Z_{1i} 和 Z_{2i} 统一用 Z_1 和 Z_2 表示,导纳矩阵对角线上元素 Y_{ii} 为:

$$Y_{ii} = I_{gi}(s)/U_{ri}(s) = \frac{1}{M_0 // Z_L // Z_s // Z_2 + Z_1} \times \frac{Z_2}{Z_2 + M_0 // Z_L // Z_s} \quad (11)$$

其中, Z_L 为负载阻抗; M_0 为 $n-1$ 个变流设备的等效

并联阻抗。

$$M_0 = \frac{1}{n-1} \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (12)$$

导纳矩阵非对角线上元素 Y_{ij} 为:

$$Y_{ij} = \frac{I_{gi}(s)}{U_{rj}(s)} = Y_{ii} \frac{M_{j0} // Z_L // Z_s}{M_{j0} // Z_L // Z_s + Z_1 Z_2 / (Z_1 + Z_2)} \quad (13)$$

其中, M_{j0} 为 $n-2$ 个变流设备的等效并联阻抗。

$$M_{j0} = \frac{1}{n-2} \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (14)$$

为了分析方便,给出统一的阻抗表达式:

$$\begin{cases} Z_p = s L_p \\ Z_z = R_z + s L_z \\ Z_{Cz} = 1/(s C_z) \\ Z_s = R_s + s L_s \\ Z_L = R_L \end{cases} \quad (15)$$

改变接入直流线路的变流设备的个数 n ,画出开环条件下网络中 Y_{ii} 的 Bode 图如图 5 所示(参数设置如下: $L_p=5 \text{ mH}, R_s=0.1 \Omega, R_z=0.1 \Omega, L_s=2 \text{ mH}, L_z=2 \text{ mH}, R_L=10 \Omega, C_z=4 \mu\text{F}$)。从而可得变流设备个数对纹波放大作用的影响。

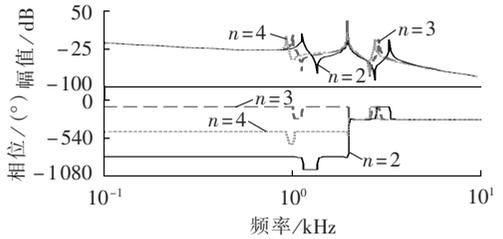


图 5 变流设备并联个数对纹波谐振的影响
Fig.5 Influence of number of parallel converters on ripple resonance

由图 5 可知,变流设备数量的增加不改变谐振峰值个数,但位于两侧的纹波谐振峰值逐渐向较低频变化,使得对应的峰-峰值间距也发生改变,谐振频率整体向低频方向移动。

3.2 多变流器接入位置对纹波谐振的影响

当多个变流设备在不同位置接入网络时,图 4 中 Z_{1i} 和 Z_{2i} 的数值不同,但整体网络结构不变。设除去第 i 个接入位置的其余 $n-1$ 个变流设备的等效并联阻抗为:

$$M = \frac{\prod_k (Z_{1k} Z_{2k})}{\sum_m \frac{\prod_k (Z_{1k} Z_{2k})}{Z_{1m}} + \sum_m \frac{\prod_k (Z_{1k} Z_{2k})}{Z_{2m}}} \quad (16)$$

其中, $k=1, 2, \dots, n$ 且 $k \neq i; m=1, 2, \dots, n$ 且 $m \neq i$ 。

这种情况下,某个变流器输出的电流与直流出口电压之间的关系为:

$$Y_{ii} = \frac{I_{gi}(s)}{U_{ri}(s)} = \frac{1}{M // Z_L // Z_s // Z_2 + Z_1} \frac{Z_2}{Z_2 + M // Z_L // Z_s} \quad (17)$$

同样可以计算多个变流设备在不同位置接入

时,导纳矩阵非对角线上元素为:

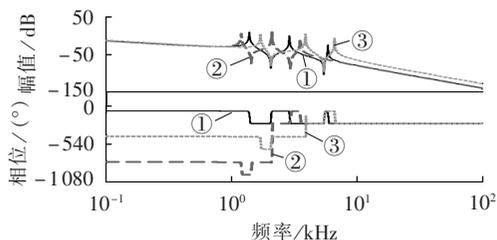
$$Y_{ij} = \frac{I_{gi}(s)}{U_{vj}(s)} = Y_{ii} \frac{M_j // Z_L // Z_s}{M_j // Z_L // Z_s + \frac{Z_{L1} Z_{2j}}{Z_{L1} + Z_{2j}}} \quad (18)$$

其中, M_j 为除去第 i 个位置和第 j 个位置的其余 $n-2$ 个变流设备的等效并联阻抗。

$$M_j = \frac{\prod_k (Z_{Lk} Z_{2k})}{\sum_m \frac{k}{Z_{1m}} + \sum_m \frac{k}{Z_{2m}}} \quad (19)$$

其中, $k=1, 2, \dots, n$ 且 $k \neq i, k \neq j; m=1, 2, \dots, n$ 且 $m \neq i, m \neq j$ 。

设有 2 个变流设备接入直流系统, 参数设置如下: 分散接入时, $R_{z1}=0.1 \Omega, L_{z1}=2 \text{ mH}, C_{z1}=4 \mu\text{F}, R_{z2}=0.05 \Omega, L_{z2}=1 \text{ mH}, C_{z2}=2 \mu\text{F}$; 远端集中接入时, $R_z=0.1 \Omega, L_z=2 \text{ mH}, C_z=2 \mu\text{F}$; 近端集中接入时, $R_z=0.05 \Omega, L_z=1 \text{ mH}, C_z=2 \mu\text{F}$ 。分析 Y_{11} 的结果如图 6 所示。



① 分散接入, ② 远端集中接入, ③ 近端集中接入

图 6 接入位置对纹波谐振的影响

Fig.6 Influence of connection location on ripple resonance

由图 6 可知, 接入方式和接入位置影响谐振峰-峰值间距, 分散接入时的 Bode 图特征曲线位于近端集中接入和远端集中接入时两特征曲线之间。

4 变流设备耦合作用对纹波谐振的影响

考虑控制方式对直流侧输出电流的影响, 将诺顿等效模型中的闭环短路电流 i_{sc} 用变流设备直流侧输出电流 i_{dc} 表示。依据不同的变流器控制方式, 送入直流电网的电流 i_{dc} 有着不同的表达式。闭环状态下包含线路等效参数的导纳网络如图 7 所示。图中, i_{sci} 为端口 i 的短路电流; $Y_{\Sigma i}$ 为端口 i 的输入导纳; Y_s 为直流电源系统的等效导纳。负荷没有在图中表示。

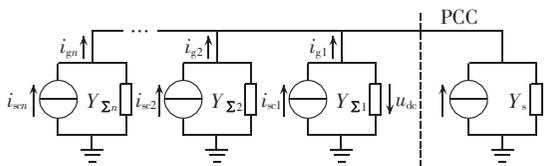


图 7 闭环等效导纳网络

Fig.7 Equivalent admittance network in closed loop mode

针对每个诺顿等效模型, 有:

$$\begin{bmatrix} i_{g1} - i_{sc1} \\ i_{g2} - i_{sc2} \\ \vdots \\ i_{gn} - i_{scn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{\Sigma 1} \\ Y_{\Sigma 2} \\ \vdots \\ Y_{\Sigma n} \end{bmatrix} u_{dc} \quad (20)$$

根据流入和流出公共耦合点(PCC)的电流相等, 可得网络电流关系为:

$$\sum_{i=1}^n i_{gi} = \sum_{i=1}^n i_{sci} - \sum_{i=1}^n Y_{\Sigma i} u_{dc} = (Y_L + Y_s) u_{dc} - Y_s u_s \quad (21)$$

可见, 由于 $Y_{\Sigma i} u_{dc}$ 项的存在, 各个变流设备不是完全独立的, 而是存在耦合作用。

根据式(20)和式(21)可得设备 i 和设备 j 之间的耦合作用关系为:

$$I_{gi}(s) = I_{sci}(s) - Y_{\Sigma i} U_{dc}(s) = I_{sci}(s) - \frac{Y_{\Sigma i}}{H} \left(\sum_{j=1}^n I_{scj}(s) + Y_s U_s(s) \right) = \left(1 - \frac{Y_{\Sigma i}}{H} \right) I_{sci}(s) - \frac{Y_{\Sigma i}}{H} \left(\sum_{j=1, j \neq i}^n I_{scj}(s) + Y_s U_s(s) \right) \quad (22)$$

$$H = \sum_{j=1}^n Y_{\Sigma j} + Y_L + Y_s \quad (23)$$

以 I_{gi} 和 I_{scj} 的关系表示不同设备间的耦合作用, 则设备 i 和设备 j 之间的耦合系数为:

$$K_{ij}(s) = Y_{\Sigma i} / H \quad (24)$$

根据式(24), 在相同位置接入变流设备时, 接入个数 n 对设备 i 和设备 j 之间耦合程度的影响结果如图 8 所示。

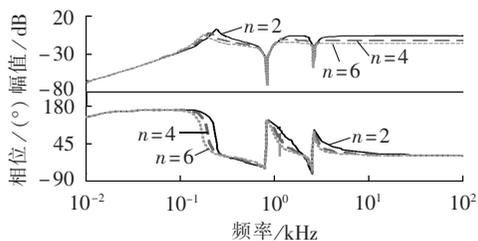


图 8 相同接入位置时 n 对耦合程度的影响

Fig.8 Influence of n on coupling degree for same connection location

由于等效模型中包含线路长度参数, 故可以方便地计算出接入位置相同或不同时各个变流设备间的耦合作用。对比图 8, 将 n 个设备在不同位置接入时对设备耦合程度的影响结果如图 9 所示。图中, n_1 和 n_2 分别为在位置 1 和位置 2 处接入的变流设备数量。

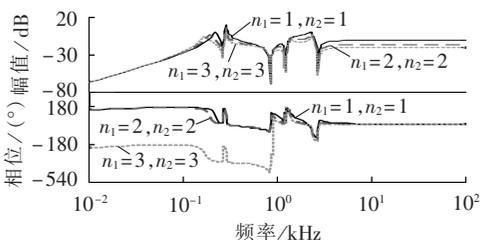


图 9 不同位置接入时 n 对耦合程度的影响

Fig.9 Influence of n on coupling degree for different connection locations

由图 9 可知,随着 n 的增加,设备 i 和设备 j 之间的耦合作用变弱,结合图 5 可知,耦合程度变弱使纹波谐振频率向低频方向移动。且不同位置间的耦合作用比同一位置处的耦合作用更复杂,随着 n 的增加,耦合作用也变弱。

可见,如果网络中接入变流设备的数量和位置规划均不合理,极易使某一频率附近的纹波放大严重,超出限制,破坏用电设备,甚至危害系统的稳定运行。

5 仿真分析

5.1 纹波形成机理仿真分析

当交流侧含 2、3、4 次谐波时,直流侧的纹波频谱图如图 10 所示。

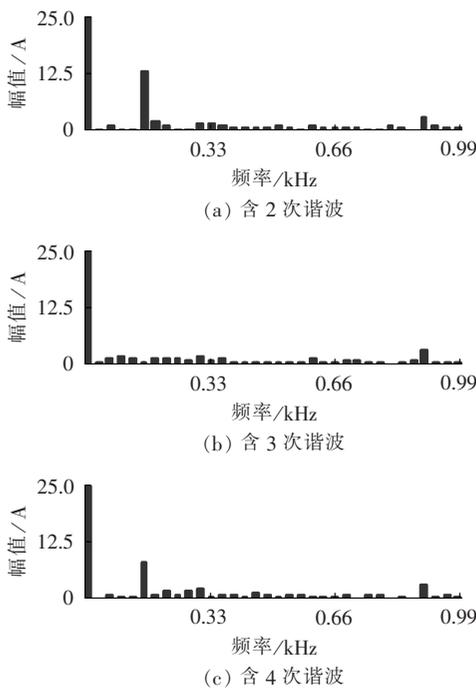


图 10 直流纹波频谱

Fig.10 Spectrums of DC ripple

由于交流三相对称,当交流侧含 2 次谐波时,直流侧纹波的主要频率成分为 150 Hz;当交流侧含 3 次谐波时,直流侧纹波几乎不受交流侧谐波影响;当交流侧含 4 次谐波时,直流侧纹波的主要频率成分也为 150 Hz。仿真结果与式(4)分析结果一致。

交流负荷不平衡对直流线路电压的影响如图 11 所示。此时,直流侧电压不是恒定的,含有纹波分量。经分析,纹波的主要频率成分为 100 Hz。

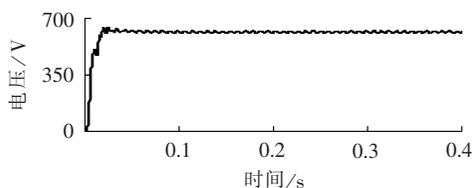


图 11 直流电压纹波波形

Fig.11 Waveform of DC voltage ripple

5.2 纹波谐振仿真分析

为了验证上述直流系统中纹波谐振理论的正确性及变流设备接入个数、接入位置对谐振作用的影响,在 MATLAB/Simulink 中搭建了仿真模型,系统参数如表 1 所示。值得说明的是,本文仿真中以接入多个整流器为例,各整流器的控制方式相同,均采用定电压控制,且单个整流器接入时,控制器的参数能够保证良好的输出特性。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	数值	参数	数值
交流侧电压	0.4 kV	滤波电感	5 mH
直流侧电压幅值	0.5 kV	直流线路电阻	0.3 Ω
PI 调节器系数	3+1/s	直流线路电感	6 mH
P 调节器系数	0.15	直流线路电容	12 μ F
开关频率	8 kHz	直流系统电阻	0.3 Ω
支撑电容	3500 μ F	直流系统电感	6 mH

当单个整流器接入时,直流线路电流的频谱如图 12 所示。

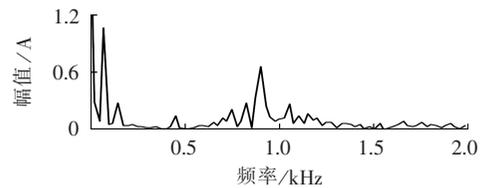


图 12 单个整流器接入时线路电流频谱

Fig.12 Spectrum of line current when single rectifier is connected

变流器脉冲宽度调制(PWM)中本身含有丰富的谐波成分,图 12 中 0.9~1 kHz 的纹波幅值被放大,说明同时具备纹波源和谐振网络时,就会引起直流系统的谐振,降低系统的电能质量水平。

图 13 为直流线路同一位置处整流器并联个数增加时,直流线路上的电流频谱。

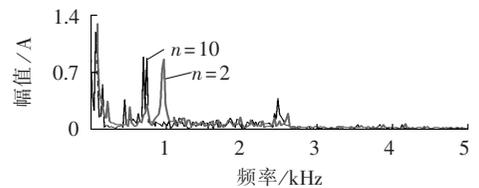


图 13 多个整流器接入时线路电流频谱

Fig.13 Spectrum of line current when multiple rectifiers are connected

可见,并联接入的整流器数量直接影响直流侧的谐振特性。与单个整流器接入相比,在 0.8~1 kHz 附近和 2.4~2.6 kHz 附近的纹波幅值被显著放大,在 0.4 kHz 附近也有放大现象,而其他纹波频率处的幅值几乎不受影响。随着接入个数的增加,谐振峰值的位置向较低频移动,与理论分析中图 6 所示结果一致。

为了验证接入位置对谐振特性的影响,按照表 2 给出的整流器在不同位置接入的位置参数进行设置,分析网络中谐振的特点。

表 2 3 种位置参数
Table 2 Parameters of three locations

位置	参数
位置 1	$R_z=0.3 \Omega, L_z=6 \text{ mH}, C_z=12 \mu\text{F}$
位置 2	$R_z=0.5 \Omega, L_z=10 \text{ mH}, C_z=20 \mu\text{F}$
位置 3	$R_z=0.8 \Omega, L_z=16 \text{ mH}, C_z=32 \mu\text{F}$

图 14 为单个整流器分别接入位置 1、位置 2、位置 3 的直流线路电流频谱图。由图可知,不同接入位置使发生谐振的频率点改变,随着接入位置距离的增加,谐振频率降低。谐振峰值大小受整流器 PWM 输出的各纹波频率处的幅值大小影响。

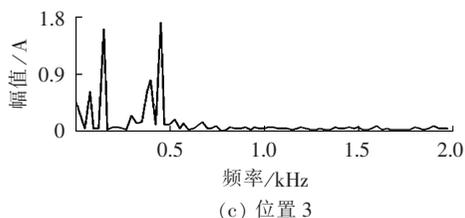
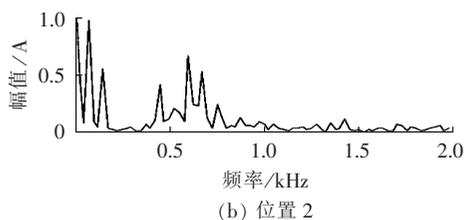
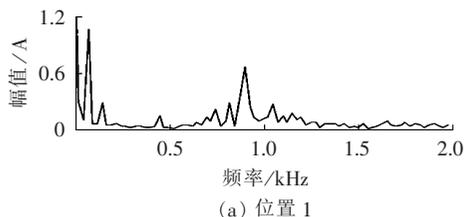


图 14 单个整流器接入线路不同位置时的电流频谱

Fig.14 Spectrums of line current when single rectifier is connected at different locations respectively

当网络中有 10 个整流器按 3:4:3 的比例分别接于位置 1、位置 2 和位置 3,则直流线路上输出电流频谱图如图 15 所示。

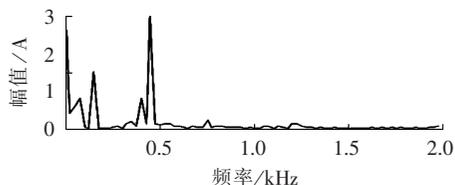


图 15 多个整流器接入线路不同位置时的电流频谱

Fig.15 Spectrum of line current when multiple rectifiers are connected at different locations

由图 15 可知,整流器接入个数的增加和接入距离的增加都使得谐振频率发生变化,向低频方向移动,导致 500 Hz 附近频率成分的幅值放大严重。

仿真分析结果证明了纹波谐振问题确实存在,若系统中因不理想因素导致含有更大幅值的纹波,则其发生谐振后的幅值也相应放大,这对系统的稳定运行是极为不利的。

6 结论

本文分析了直流配电网纹波的形成机理,建立了直流侧纹波阻抗模型和等效电路,推导了多变流器接入个数和接入位置对纹波谐振影响的关系,表明随着接入个数的增加,纹波谐振的频率降低,变流设备分散接入或集中接入的位置也影响纹波谐振的频率;阐明了接入直流配电网的多个变流设备间具有耦合作用,耦合作用的减弱使纹波谐振频率降低。本文研究内容为合理配置变流设备接入数量和接入位置、防止纹波在某一频率附近出现严重的放大现象提供理论依据。

参考文献:

- [1] 赵彪,赵宇明,王一振,等. 基于柔性中压直流配电网的能源互联网系统[J]. 中国电机工程学报,2015,35(19):4843-4851.
ZHAO Biao,ZHAO Yuming,WANG Yizhen,et al. Energy internet based on flexible medium-voltage DC distribution[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(19):4843-4851.
- [2] 张永明,丁宝,傅卫东,等. 基于直流配电与直流微网的电气节能研究[J]. 电工技术学报,2015,30(增刊 1):389-397.
ZHANG Yongming,DING Bao,FU Weidong,et al. Electrical energy conservation based on DC distribution and DC microgrid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2015,30 (Supplement 1):389-397.
- [3] 刘闯,崔剑锋,刘海洋,等. 适合直流配电网的有源前端控制器[J]. 电力自动化设备,2016,36(7):104-110,117.
LIU Chuang,CUI Jianfeng,LIU Haiyang,et al. Active front-end controller for DC distribution[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(7):104-110,117.
- [4] SALONEN P,KAIPPIA T,NUUTINEN P,et al. An LVDC distribution system concept [C]//Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics (NORPIE/2008). Espoo,Finland:[s.n.],2008: 1-7.
- [5] LIU Tianhao,LI Gengyin,HAN Bing,et al. Research on the topology of DC distribution network and the influence of distributed generations access to the network[C]//2015 IEEE 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT). Changsha, China; IEEE, 2015: 512-517.
- [6] 李霞林,郭力,王成山,等. 直流微电网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报,2016,36(1):2-16.
LI Xialin,GUO Li,WANG Chengshan,et al. Key technologies of DC microgrids:an overview[J]. Proceedings of the CSEE,2016, 36(1):2-16.
- [7] 孙鹏飞,贺春光,邵华,等. 直流配电网研究现状与发展[J]. 电力

- 自动化设备,2016,36(6):64-73.
- SUN Pengfei, HE Chunguang, SHAO Hua, et al. Research status and development of DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6):64-73.
- [8] MUSOLINO V, PIEGARI L, TIRONI E, et al. Simulations and field test results for potential applications of LVDC distribution network to reduce flicker effect[C]//IEEE Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP 2010). Bergamo, Italy: IEEE, 2010: 1-6.
- [9] 曾嘉思, 徐习东, 赵宇明. 交直流配电网可靠性对比[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2582-2589.
- ZENG Jiasi, XU Xidong, ZHAO Yuming. Reliability comparison of AC and DC distribution network[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2582-2589.
- [10] 郑欢, 江道灼, 杜翼. 交流配电网与直流配电网的经济性比较[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3368-3374.
- ZHENG Huan, JIANG Daozhuo, DU Yi. Economic comparison of AC and DC distribution system[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3368-3374.
- [11] 杜翼, 江道灼, 尹瑞, 等. 直流配电网拓扑结构及控制策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(1): 139-145.
- DU Yi, JIANG Daozhuo, YIN Rui, et al. Topological structure and control strategy of DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1): 139-145.
- [12] 杨舒婷, 王承民, 李骄阳, 等. 直流配电网的集中-分布式控制策略[J]. 电网技术, 2016, 33(10): 3073-3080.
- YANG Shuting, WANG Chengmin, LI Jiaoyang, et al. Centralized-distributed control strategies in DC distribution[J]. Power System Technology, 2016, 33(10): 3073-3080.
- [13] 王成山, 李薇, 王议锋, 等. 直流微电网母线电压波动分类及抑制方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 84-97.
- WANG Chengshan, LI Wei, WANG Yifeng, et al. DC bus voltage fluctuation classification and restraint methods review for DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 84-97.
- [14] KOURMPELIS T, PROUSALIDIS J, SPATHIS D, et al. Power quality analysis for the highly-electric asset with DC power distribution[C]//2015 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS). Aachen, Germany: IEEE, 2015: 1-7.
- [15] HE Qiuping, HAN Yongxia, LI Licheng, et al. Study on the overvoltage and insulation coordination of flexible DC power distribution network[C]//2014 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). Hong Kong, China: IEEE, 2014: 1-5.
- [16] 曾正, 邵伟华, 冉立, 等. 基于直流电气弹簧的直流配电网电压波动抑制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 23-31.
- ZENG Zheng, SHAO Weihua, RAN Li, et al. DC electric spring for voltage fluctuation suppressing of DC distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 23-31.
- [17] MAGRO M C, MARISCOTTI A, PINCETI P. Definition of power quality indices for DC low voltage distribution networks[C]//2006 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings. Sorrento, Italy: IEEE, 2006: 1885-1888.
- [18] MARISCOTTI A. Methods for ripple index evaluation in DC low voltage distribution networks[C]//2007 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC 2007). Warsaw, Poland: IEEE, 2007: 1-4.
- [19] PEI Xuejun, ZHOU Wu, KANG Yong. Analysis and calculation of DC-link current and voltage ripples for three-phase inverter with unbalanced load[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(10): 5401-5412.
- [20] 高一波, 徐习东, 金阳忻, 等. 交流侧接地故障对直流配电网电压平衡影响[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2665-2670.
- GAO Yibo, XU Xidong, JIN Yangxin, et al. Impact on the voltage balancing of DC distribution network under AC side grounding fault[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2665-2670.
- [21] 曾正, 赵荣祥, 吕志鹏, 等. 光伏并网逆变器的阻抗重塑与谐波谐振抑制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4547-4558.
- ZENG Zheng, ZHAO Rongxiang, LÜ Zhipeng, et al. Impedance reshaping of grid-tied inverters to damp the series and parallel harmonic resonances of photovoltaic systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27): 4547-4558.
- [22] 许德志, 汪飞, 毛华龙, 等. 多并网逆变器与电网的谐波交互建模与分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12): 64-71.
- XU Dezhi, WANG Fei, MAO Hualong, et al. Modeling and analysis of harmonic interaction between multiple grid-connected inverters and the utility grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(12): 64-71.

作者简介:



王宁

王宁(1981—),男,河北辛集人,讲师,博士,主要研究方向为微电网电能质量分析与控制(E-mail: wnbull@sina.com);

袁杰(1994—),男,河北邯郸人,硕士研究生,主要研究方向为直流配电网电能质量分析与控制(E-mail: 597905376@qq.com);

焦晋荣(1990—),女,山西大同人,硕士研究生,主要研究方向为直流配电网电能质量分析与控制(E-mail: 18713502161@139.com)。

Ripple resonance of DC distribution network with multiple converters

WANG Ning¹, YUAN Jie¹, JIAO Jinrong¹, JIA Qingquan¹, SHI Leilei^{1,2}

(1. Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

2. State Grid Hebei Electric Power Company Xingtai Power Supply Branch, Xingtai 054001, China)

Abstract: Ripple is a typical power quality problem of DC distribution network and ripple resonance not only affects its power quality but also endangers its safe and stable operation. The phenomenon of ripple resonance in the DC-side network structure is studied. The ripple due to the voltage distortion and three-phase imbalance at the AC side of input port is analyzed in mechanism. The equivalent circuit of DC distribution network with multiple converters is established and the influences of their number and location on the ripple resonance are researched. The coupling coefficient between converters is deduced and the influence of coupling effect between converters on the ripple resonance is studied. Simulative results verify the validity of theoretical analysis and the established model.

Key words: DC distribution network; power quality; multiple converters; ripple resonance; coupling