

# 城市配网改造下中压直流配电网的供电能力分析

曹文远<sup>1</sup>, 韩民晓<sup>1</sup>, 谢文强<sup>1</sup>, 李蕊<sup>2</sup>

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

## Research on the Power Supply Capacity of Medium Voltage DC Distribution Network in Urban Distribution Network Transformation

CAO Wenyuan<sup>1</sup>, HAN Minxiao<sup>1</sup>, XIE Wenqiang<sup>1</sup>, LI Rui<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Source, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**摘 要:** 我国的城市配电网正面临供电能力不足的压力, 中压直流配电方式的出现为城市配电网的改造提供了一个新的思路和方法。基于可靠性和适应性的要求, 本文选择双极三线制作为直流配电网的接线方式。首先考虑交直流线路的过电压水平, 确定了交直流配电网额定电压的关系。在此基础上, 从电压损耗、功率损耗以及供电容量 3 个方面, 对中压交、直流配电网的供电能力进行了理论推导, 建立了交、直流配电网供电能力的通用模型。并以常用的中压电缆 YJV-300 为例, 分析发现中压直流配电网的供电能力显著优于中压交流配电网。特别的, 本文研究了直流配电网线路发生单极故障时的供电能力, 发现其供电能力相对于交流配电网而言也具有一定的优势。

**关键词:** 城市配网改造; 中压直流配电; 供电能力; 通用模型; 单极故障

**Abstract:** China's urban distribution network is facing the pressure of insufficient power supply capacity. The emergence of medium voltage DC (MVDC) distribution mode provides a new idea and method for urban distribution network transformation. Considering the reliability and adaptability, bipolar three-wire connection mode is selected as the connection mode of MVDC distribution network. Firstly, the rated voltage relationship between AC and DC distribution network is determined by considering the over-voltage level of the AC and DC lines. Then, the power supply capacity of MVDC and MVAC distribution networks is deduced from three aspects of voltage loss, power loss and power supply capacity, and the universal model of power supply capacity for AC and DC distribution network is built. Finally, by taking commonly used medium voltage cable YJV-300 as example, analysis shows that the power supply

capacity of MVDC distribution network is significantly superior to that of MVAC distribution network. In particular, the power supply capacity of the DC distribution network is studied when monopole grounding fault occurs, and it is found that the DC power distribution network also has a certain advantage on power supply capacity by comparing to AC distribution network.

**Keywords:** urban distribution network transformation; MVDC distribution; power supply capacity; universal model; monopole grounding fault

## 0 引 言

随着我国经济的快速发展, 各大城市用电负荷日益密集, 我国的城市配电网正面临着线路走廊紧张、供电容量不足、供电半径较短等问题<sup>[1-5]</sup>。直流配电网以其有利于清洁能源的接入、提升供电容量、提高电能质量以及降低配电网线路损耗等优点, 成为了国内外研究的焦点<sup>[6-10]</sup>。对城市现有交流配电网进行改造, 在当前的配电网中引进直流配电, 甚至是构建以直流为主的配电网, 可有效地解决交流电网所面临的诸多问题。

目前国内外研究中压直流配电网供电能力的文章较少。文献 [2] 对单极对称接线方式下直流配电网与交流配电网的供电能力进行了比较分析, 但其交直流电压关系的建立只是简单的基于运行过程中线路承受的最大电压, 并未深入分析交直流线路能承受的操作过电压水平; 文献 [4] 在电压降和功率损耗约束条件下, 建立模型分析了直流配电网的供电能力; 文献 [11] 分别对三线和两线制直流配电网进行了供电能力分析, 并将其与交流配电网

基金项目: 国家电网公司科技项目(PDB 17201600116)

对比；文献 [12] 对直流配电网的效率进行分析，全面比较了交流配电网的线路损耗和变压器损耗、直流配电网的线路损耗和换流器损耗的大小。目前尚未有文献分析交直流线路的操作过电压水平，并在此基础上建立交直流电压关系。也没有文献根据城市配电网改造的实际需要，对双极三线制接线方式的直流配电网在正常运行以及发生单极故障情况下的供电能力进行系统的分析。

本文推导出了双极三线制接线方式的直流配电网在正常运行及发生单极故障时的供电能力的通用计算模型，并以常用中压电缆 YJV-300 为例对交、直流配电网的供电能力进行了比较分析。

## 1 交直流电压关系的确定以及直流配电网接线方式的选取

### 1.1 直流电压的确定

基于城市配电网改造的实际情况，本文假设交直流所用线路相同，即线路的绝缘水平一致。对同样的绝缘，设直流的耐受电压为  $U_{dw}$ ，交流的耐受电压有效值为  $U_{aw}$ ，交流的操作过电压倍数为  $k_a$ （标么值，以最高运行相电压的峰值为基准），直流的操作过电压倍数为  $k_d$ ，当交直流所需的绝缘强度相等时，有

$$\frac{k_a \sqrt{2} \frac{U_{AC}}{\sqrt{3}}}{\sqrt{2} U_{aw}} = \frac{k_d U_{DC}}{U_{dw}} \quad (1)$$

令

$$k = \frac{U_{dw}}{U_{aw}} \times \frac{k_a}{k_d} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

可得直流单极对地电压与交流线电压的关系为

$$U_{DC} = k U_{AC} \quad (3)$$

式中： $U_{DC}$ 为直流单极对地电压（直流额定电压）； $U_{AC}$ 为交流线电压（交流额定线电压）； $k$ 为直流单极对地电压对交流线电压可以提高的倍数。

因目前我国城市配电网中仍以架空线路为主，所以下面对架空交流线路改造成直流线路后的耐压水平进行分析，从而确定其额定直流电压。

对 35~60kV 及以下系统（电网中性点非直接接地），我国有关规程进行绝缘配合时计算用操作过电压倍数：交流相对地的耐压水平不低于 4.0，相间耐压水平为相对地过电压的 1.3~1.4 倍；直流系统一般可将过电压限制在额定电压的 1.5~

1.7 倍<sup>[13]</sup>。

对于相同的线路，可承受的最大电压相等，所以单极不对称接线方式时， $U_{dw} = \sqrt{2} U_{aw}$ ，此时直流电压与交流电压之比：

$$k = \frac{U_{dw}}{U_{aw}} \times \frac{k_a}{k_d} \times \frac{1}{\sqrt{3}} = \sqrt{2} \times \frac{4.0}{1.7} \times \frac{1}{\sqrt{3}} = 1.92 \quad (4)$$

对单极对称（伪双极）及双极（真双极）接线方式，直流电压与交流电压之比：

$$k = \frac{U_{dw}}{U_{aw}} \times \frac{k_a}{k_d} \times \frac{1}{\sqrt{3}} = \sqrt{2} \times \frac{4.0 \times 1.3}{1.7 \times 2} \times \frac{1}{\sqrt{3}} = 1.25 \quad (5)$$

电力架空线路不同接线方式下直流额定电压与交流额定线电压的比值关系如表 1 所示。

表 1 不同接线方式下  $k$  的取值

线路类型及接线方式	$k$
双极	1.25
单极对称	1.25
单极不对称	1.92

### 1.2 接线方式的选取

直流配电网的典型接线方式有：单极不对称接线方式、单极对称接线方式、双极双线制接线方式和双极三线制接线方式。

由于单极不对称大地或海水回线接线方式时对接地极的材料、设置方式有较高要求，且会造成生态影响，单极不对称金属回线方式时采用两回导体在经济上是不合理的，所以实际过程中较少采用<sup>[14]</sup>。



图 1 单极不对称大地或海水回线接线方式

对于单极对称接线方式，只要配电网中一端发生换流器或者线路故障，整个系统就无法运行，可靠性较低。

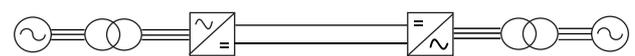


图 2 单极对称接线方式

双极接线方式在单极故障时能实现单极运行，但双极双线制结构在单极金属性接地故障后正常极

电压会变为原来的2倍。

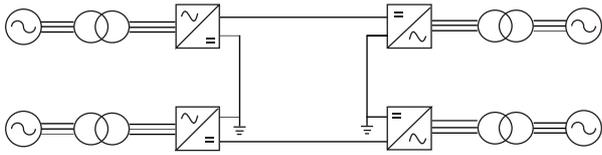


图3 双极双线制接线方式

双极三线制结构不存在这个问题，当直流系统发生单极故障时，故障极退出运行，非故障极实现单极运行。且在城市交流配电网改造中，双极三线制结构能更好地适应现有的三相交流线路。

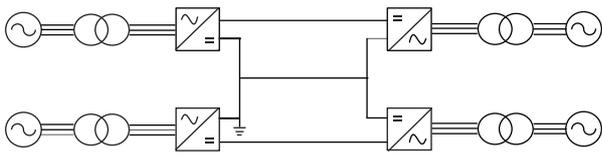


图4 双极三线制接线方式

此外，由文献 [15] 可知，双极三线结构的接线方式可扩展为多端直流系统，使改造后的多端直流系统具有三极直流的扩容能力，同时拥有双极直流的易扩展性（即免去三极 MTDC 的协调控制难度）。再者，文献 [16] 对 ±500kV 永富直流输电工程的接线方式进行分析，发现双极三线制接线方式能满足不平衡电流大于 1580 A 的各种正常或不正常运行方式，并且除非出于节能降损考虑，运行方式基本不受限制。综上，本文考虑双极三线制结构的直流配电网接线方式，结合表 1， $k$  值和直流额定电压选为

$$k = 1.25 \quad (6)$$

$$U_{DC} = kU_{AC} = 1.25U_{AC} \quad (7)$$

## 2 电压损耗

配电网的供电能力指的是配电线路的供电距离以及可承载负荷多少的能力，可以用电压损耗、功率损耗以及供电容量来表征配电网的供电能力。电压损耗是指线路始、末两端电压的数值差 ( $U_1 - U_2$ )<sup>[17]</sup>。对交流线路，其单相电力线路模型如图 5 所示。

假定线路输送功率  $P$  一定。设  $U_2 = U_2 \angle 0^\circ$  (参考电压)，则在线路阻抗  $Z$  上的电压降为

$$d\dot{U} = \frac{\dot{S}}{\dot{U}_2} Z = \frac{P - jQ}{3U_2} (R + jX) =$$

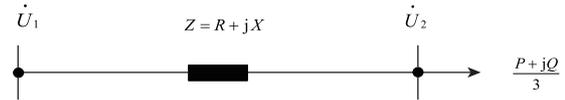


图5 单相电力线路模型图

$$\frac{PR + QX}{3U_2} + j \frac{PX - QR}{3U_2} \quad (8)$$

令

$$\frac{PR + QX}{3U_2} = \Delta U, \quad \frac{PX - QR}{3U_2} = \delta U \quad (9)$$

于是有

$$d\dot{U} = \Delta U + j\delta U \quad (10)$$

其中  $\Delta U$  是相电压降落的纵分量， $\delta U$  是相电压降落的横分量。电压相量图如图 2 所示。

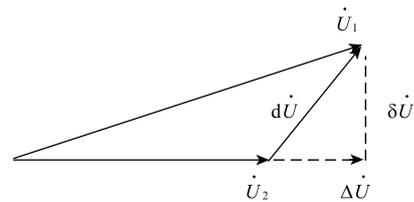


图6 电压相量图

对于 110kV 及以下的电力网， $\delta U$  对电压降落的影响不大，可忽略不计。因而相电压损耗可表示为

$$dU = \Delta U = \frac{PR + QX}{3U_2} \quad (11)$$

线电压损耗：

$$\Delta U_{AC} = \sqrt{3}\Delta U = \sqrt{3} \frac{PR + QX}{3U_2} = \frac{PR + QX}{U_{AC}} = \frac{P}{U_{AC} \cos \varphi} (r_{AC} \cos \varphi + x \sin \varphi) l \quad (12)$$

所以交流电压损耗率为

$$\Delta U_{AC} \% = \frac{P}{U_{AC}^2 \cos \varphi} (r_{AC} \cos \varphi + x \sin \varphi) l \quad (13)$$

式中： $P$  为线路输送功率； $\Delta U_{AC}$  为交流电压损耗； $\Delta U_{AC} \%$  为交流电压损耗率； $\varphi$  为负载的功率因数角； $r_{AC}$  为线路单位长度交流电阻； $x$  为线路单位长度电抗； $l$  为线路长度。

### 2.1 直流系统正常运行

对于双极三线制结构的直流配电网，在配送的功率  $P$  与交流配电网相同时，直流线路的电压损耗：

$$\Delta U_{DC} = 2IR = \frac{2P}{2U_{DC}} R = \frac{Pr_{DC} l}{U_{DC}} \quad (14)$$

直流电压损耗率：

$$\Delta U_{DC} \% = \frac{\Delta U_{DC}}{2U_{DC}} = \frac{Pr_{DC}l}{2U_{DC}^2} \quad (15)$$

综上，直流系统正常运行时，直、交流配电网的电压损耗率之比为

$$\frac{\Delta U_{DC} \%}{\Delta U_{AC} \%} = \frac{\frac{Pr_{DC}l}{2U_{DC}^2}}{\frac{P}{U_{AC}^2 \cos \varphi} (r_{AC} \cos \varphi + x \sin \varphi) l} = \frac{U_{AC}^2 r_{DC} \cos \varphi}{2U_{DC}^2 (r_{AC} \cos \varphi + x \sin \varphi)} = \frac{r_{DC} \cos \varphi}{2k^2 (r_{AC} \cos \varphi + x \sin \varphi)} \quad (16)$$

以常见的单芯中压电缆 YJV-300 为例，对交、直流配电网的电压损耗进行比较。对于 YJV-300，单位长度直流电阻  $r_{DC} = 0.0601 \Omega/\text{km}$ ，单位长度交流电阻  $r_{AC} = 0.0797 \Omega/\text{km}$ ，单位长度电抗  $x = 0.0858 \Omega/\text{km}$ 。取  $\cos \varphi = 0.9$ ，则有

$$\frac{\Delta U_{DC} \%}{\Delta U_{AC} \%} = 0.1586 \quad (17)$$

在配送功率相同的情况下，中压直流配电网的电压损耗只有中压交流配电网电压损耗的 15.86%。由此可见，中压直流配电网可以显著减小线路的电压损耗。

## 2.2 直流系统单极故障

双极三线制接线方式的直流系统发生单极故障时，故障极退出运行，非故障极实现单极运行。此时电流通过中性线回流，输送功率为  $\frac{1}{2}$ ，直流对地电压为  $U_{DC}$ ，则直流电流：

$$I_{DC}^{(1)} = \frac{\frac{1}{2}P}{U_{DC}} = \frac{P}{2U_{DC}} \quad (18)$$

电流经过中性线回流时也会有电压损耗，所以直流电压损耗为

$$\Delta U_{DC}^{(1)} = 2I_{DC}^{(1)}R = \frac{P}{U_{DC}}R = \frac{Pr_{DC}l}{U_{DC}} \quad (19)$$

单极故障时的输送电压只是单极对地电压  $U_{DC}$ ，所以直流电压损耗率：

$$\Delta U_{DC}^{(1)} \% = \frac{\Delta U_{DC}^{(1)}}{U_{DC}} = \frac{Pr_{DC}l}{U_{DC}^2} \quad (20)$$

综上，单极故障时，直、交流配电网的电压损耗率之比为

$$\frac{\Delta U_{DC}^{(1)} \%}{\Delta U_{AC} \%} = \frac{\frac{Pr_{DC}l}{U_{DC}^2}}{\frac{P}{U_{AC}^2 \cos \varphi} (r_{AC} \cos \varphi + x \sin \varphi) l} =$$

$$\frac{r_{DC} \cos \varphi}{k^2 (r_{AC} \cos \varphi + x \sin \varphi)} = 0.3172 \quad (21)$$

当直流系统发生单极故障时，中压直流配电网的电压损耗率是中压交流配电网电压损耗率的 31.72%。此时中压直流配电网在降低电压损耗方面也有较大的优势。

中压直、交流配电网的电压损耗率之比与负载功率因数的关系如图 7 所示。

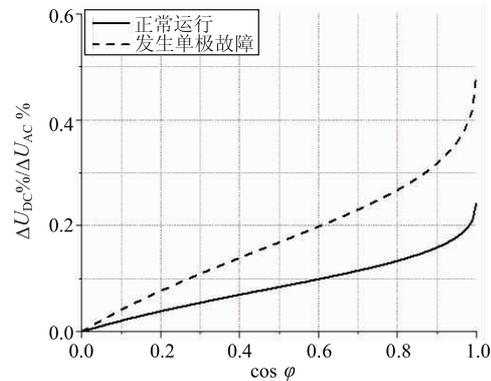


图 7 直流、交流配电网的电压损耗率之比

由图 7 可知，直流配电系统无论是正常运行还是发生单极短路故障时，直流线路的电压损耗率始终低于交流配电网线路的电压损耗率。即使当负载功率因数等于 1 时，直流线路正常运行时的电压损耗率是交流线路电压损耗率的 24%，单极运行时也只有交流线路电压损耗率的 48%。

## 3 功率损耗

对于三相三线制的交流配电网，其线路上的功率损耗：

$$\Delta P_{AC} = 3I_{AC}^2 R = 3 \left( \frac{P}{\sqrt{3}U_{AC} \cos \varphi} \right)^2 R = \frac{P^2}{U_{AC}^2} \times \frac{r_{AC}l}{\cos^2 \varphi} \quad (22)$$

交流配电网功率损耗率：

$$\Delta P_{AC} \% = \frac{P}{U_{AC}^2} \times \frac{r_{AC}l}{\cos^2 \varphi} \quad (23)$$

### 3.1 直流系统正常运行

直流配电网正常运行时，电流通过在正负极线路间流动，两回流电流大小一致，方向相反，中性线实际电流很小，可以忽略。此时功率损耗：

$$\Delta P_{DC} = 2I_{DC}^2 R = 2 \frac{P^2}{(2U_{DC})^2} r_{DC}l = \frac{P^2}{2U_{DC}^2} r_{DC}l \quad (24)$$

直流配网功率损耗率:

$$\Delta P_{DC} \% = \frac{P}{2U_{DC}^2} r_{DC} l \quad (25)$$

直流系统正常运行时,直、交流配电网功率损耗率比为

$$\frac{\Delta P_{DC} \%}{\Delta P_{AC} \%} = \frac{\cos^2 \varphi}{2} \times \frac{U_{AC}^2}{U_{DC}^2} \times \frac{r_{DC}}{r_{AC}} = \frac{\cos^2 \varphi}{2k^2} \times \frac{r_{DC}}{r_{AC}} \quad (26)$$

仍以 YJV-300 为例,

$$\frac{\Delta P_{DC} \%}{\Delta P_{AC} \%} = 0.1955 \quad (27)$$

在配送功率相同的情况下,中压直流配电网的线路功率损耗只有中压交流配电网线路功率损耗的 19.55%。

中压直流配电网正常运行时,其功率损耗率与直流配电网功率损耗率之比同负载功率因数及线路单位长度交、直流电阻比的关系如图 8 所示。

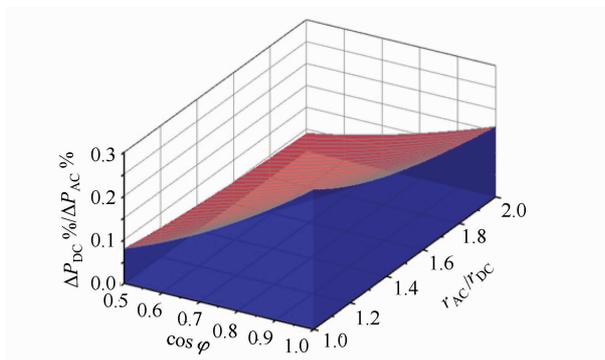


图 8 直、交流功率损耗率之比(正常运行)

由图 8 可知,当直流配电系统正常运行时,线路的功率损耗率远低于交流配电网线路的功率损耗率,且随着功率因数的减小和线路单位长度交、直流电阻比的增大,直、交流功率损耗率之比快速减小。

### 3.2 直流系统单极故障

双极三线制接线方式直流配电网单极故障时,因为电流通过中性线回流,所以仍有两条直流线路上会有功率损耗,此时直流配电网功率损耗:

$$\Delta P_{DC}^{(1)} = 2I_{DC}^{(1)2} R = 2\left(\frac{P}{2U_{DC}}\right)^2 r_{DC} l = \frac{P^2}{2U_{DC}^2} r_{DC} l \quad (28)$$

单极故障时线路输送的功率只有  $\frac{1}{2}P$ , 直流配电网功率损耗率:

$$\Delta P_{DC}^{(1)} \% = \frac{\Delta P_{DC}^{(1)}}{\frac{1}{2}P} = \frac{P}{U_{DC}^2} r_{DC} l \quad (29)$$

以 YJV-300 为例,直流系统单极故障时,交、直流配电网功率损耗率比:

$$\frac{\Delta P_{DC}^{(1)} \%}{\Delta P_{AC} \%} = \cos^2 \varphi \frac{U_{AC}^2}{U_{DC}^2} \times \frac{r_{DC}}{r_{AC}} = \frac{\cos^2 \varphi}{k^2} \times \frac{r_{DC}}{r_{AC}} = 0.3910 \quad (30)$$

当直流系统发生单极故障时,中压直流配电网的线路功率损耗率是中压交流配电网线路功率损耗率的 39.10%。此时中压直流配电网也能显著降低线路的功率损耗。

中压直流配电网发生单极故障时,其功率损耗率与直流配电网功率损耗率之比与负载功率因数及线路单位长度交、直流电阻比的关系如图 9 所示。

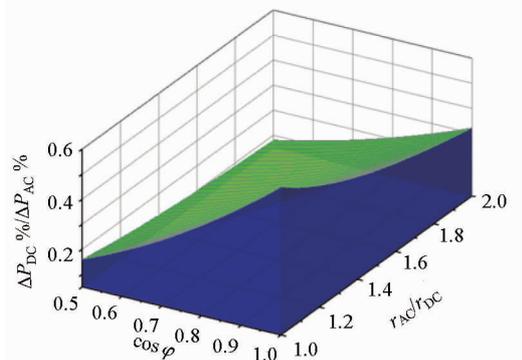


图 9 直、交流功率损耗率之比(发生单极故障)

由图 9 可知,直流配电系统发生单极故障时,虽然直流线路的功率损耗相对于系统正常运行时增加了 1 倍,但仍低于交流线路的功率损耗。

## 4 供电容量

当配电网的配电距离较小时,电压损耗不会成为供电容量的制约因素,此时供电容量由供电电流直接决定。当配电网的配电距离超过某一范围时,对电压损耗的要求开始约束配电网的最大供电容量。考虑经济性的要求,线路的功率损耗也可能成为配电网供电容量的制约因素。本节将对此 3 种情况下的直流配电网供电容量进行分析。

#### 4.1 不考虑电压损耗和功率损耗约束

##### 4.1.1 直流系统正常运行

不考虑电压损耗和功率损耗约束时，供电容量由供电电流直接决定。采用相同电缆时，线路长期运行的温度限制相同，其最大载流量也相同，即有

$$I_{DC} = I_{AC} \quad (31)$$

直流系统正常运行时，直流电压为  $U_{DC}$ ，此时直、交流供电容量之比为

$$\frac{P_{DC}}{P_{AC}} = \frac{2U_{DC}I_{DC}}{\sqrt{3}U_{AC}I_{AC}\cos\varphi} = \frac{U_{DC}}{U_{AC}} \times \frac{2}{\sqrt{3}\cos\varphi} = \frac{2k}{\sqrt{3}\cos\varphi} \quad (32)$$

由前文可知  $k=1.25$ ，取  $\cos\varphi=0.9$ ，则

$$\frac{P_{DC}}{P_{AC}} = 1.6037 \quad (33)$$

在不考虑电压损耗和功率损耗约束的情况下，中压直流配电网的供电容量明显高于交流配电网。

##### 4.1.2 直流系统单极故障

当直流系统发生单极故障时，由以上分析知，其传输的电流大小并没有发生变化，但是其电压由原来的  $\pm U_{DC}$  变为  $U_{DC}$ ，所以此时直、交流系统的供电容量之比为

$$\frac{P_{DC}^{(1)}}{P_{AC}} = \frac{U_{DC}I_{DC}^{(1)}}{\sqrt{3}U_{AC}I_{AC}\cos\varphi} = \frac{U_{DC}}{U_{AC}} \times \frac{1}{\sqrt{3}\cos\varphi} = \frac{k}{\sqrt{3}\cos\varphi} = 0.8019 \quad (34)$$

当直流系统发生单极故障时，中压直流配电网的最大供电容量略小于交流配电网的最大供电容量。

#### 4.2 考虑电压损耗

##### 4.2.1 直流系统正常运行

当配电网的配电距离超过某一范围时，对电压损耗的要求开始约束配电网的最大供电容量。对于交流线路，中压配网三相供电电压允许偏差为额定电压的  $\pm 7\%$ <sup>[18]</sup>。相应的，本文取直流电压允许偏差为直流额定电压的  $\pm 7\%$ ，则由式(13)和式(15)得

$$P_{AC} = \Delta U_{AC} \% \times \frac{U_{AC}^2 \cos\varphi}{(r_{AC} \cos\varphi + x \sin\varphi)l} \quad (35)$$

$$P_{DC} = \Delta U_{DC} \% \times \frac{2U_{DC}^2}{2r_{DC}l} \quad (36)$$

$$\frac{P_{DC}}{P_{AC}} = \frac{2U_{DC}^2 (r_{AC} \cos\varphi + x \sin\varphi)l}{U_{AC}^2 \cos\varphi r_{DC}l} = \frac{2k^2 (r_{AC} \cos\varphi + x \sin\varphi)}{r_{DC} \cos\varphi} \quad (37)$$

仍以常见的单芯中压电缆 YJV-300 为例，则有

$$\frac{P_{DC}}{P_{AC}} = 6.3052 \quad (38)$$

在考虑电压损耗约束的情况下，中压直流配电网能显著提高配电网的供电容量。

##### 4.2.2 直流系统单极故障

当直流系统发生单极故障时，由式(20)有

$$P_{DC}^{(1)} = 7\% \times \frac{U_{DC}^2}{r_{DC}l} \quad (39)$$

$$\frac{P_{DC}}{P_{AC}} = \frac{U_{DC}^2 (r_{AC} \cos\varphi + x \sin\varphi)l}{U_{AC}^2 \cos\varphi r_{DC}l} = \frac{k^2 (r_{AC} \cos\varphi + x \sin\varphi)}{r_{DC} \cos\varphi} = 3.1526 \quad (40)$$

当直流系统发生单极故障时，在考虑电压损耗约束的情况下，中压直流配电网的最大供电容量仍比交流配电网大。

考虑电压损耗约束时，直、交流配电网供电容量之比与功率因数的关系如图 10 所示。

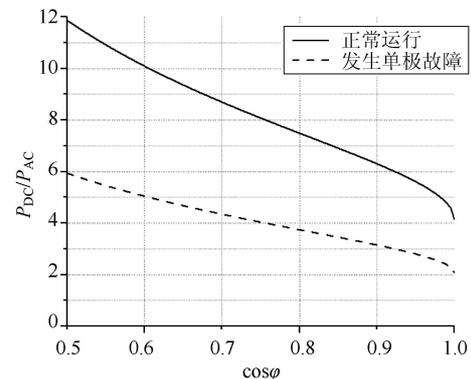


图 10 电压损耗约束下的直、交流配电网供电容量之比

由图 10 可知，当直流配电系统正常运行时，直流线路的供电容量始终高于交流配电网的供电容量。当直流配电系统发生单极故障时，即使是在交流负载功率因数接近 1 的情况下，其供电容量也是交流配电网的 2 倍。

#### 4.3 考虑功率损耗

##### 4.3.1 直流系统正常运行

虽然交流系统对线路的功率损耗没有明确的要求，但是考虑经济性的要求，线路的功率损耗不能太大。当以线路功率损耗作为约束条件计算时，根据经验值，选择功率损耗为  $3\%$ <sup>[4]</sup>，根据式(23)和式(25)有

$$P_{AC} = 3\% \times \frac{U_{AC}^2 \cos^2 \varphi}{r_{AC} l} \quad (41)$$

$$P_{DC} = 3\% \times \frac{2U_{DC}^2}{r_{DC} l} \quad (42)$$

$$\frac{P_{DC}}{P_{AC}} = \frac{2U_{DC}^2 r_{AC} l}{U_{AC}^2 \cos^2 \varphi r_{DC} l} = \frac{2k^2}{\cos^2 \varphi} \times \frac{r_{AC}}{r_{DC}} = 5.1151 \quad (43)$$

在考虑线路功率损耗约束的情况下,中压直流配电网能明显提高配电网的供电容量。

考虑功率损耗约束,中压直流配电网正常运行时,其供电容量与负载功率因数及线路单位长度交、直流电阻比的关系如图 11 所示。

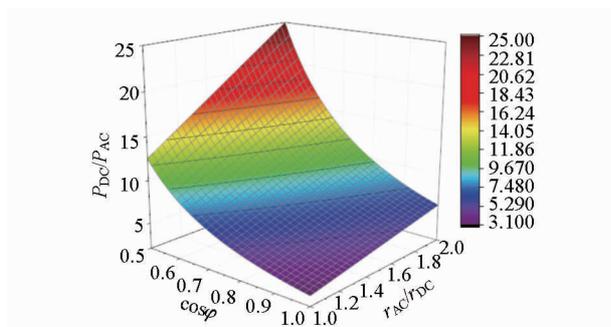


图 11 功率损耗约束下的直、交流配电网供电容量之比(正常运行)

由图 11 可知,考虑功率损耗约束,当直流配电系统正常运行时,直流线路的供电容量始终高于交流配电网的供电容量。且随着功率因数的减小和线路单位长度交、直流电阻比的增大,直、交流供电能力之比快速增大。

#### 4.3.2 直流系统单极故障

当直流系统发生单极故障时,由式(29)有

$$P_{DC}^{(1)} = 3\% \times \frac{U_{DC}^2}{r_{DC} l} \quad (44)$$

$$\frac{P_{DC}}{P_{AC}} = \frac{U_{DC}^2 r_{AC} l}{U_{AC}^2 \cos^2 \varphi r_{DC} l} = \frac{k^2}{\cos^2 \varphi} \times \frac{r_{AC}}{r_{DC}} = 2.5575 \quad (45)$$

当直流系统发生单极故障时,在考虑线路功率损耗约束的情况下,中压直流配电网的优势仍很明显。

考虑功率损耗约束,中压直流配电网发生单极故障时,其供电容量与负载功率因数及线路单位长度交、直流电阻比的关系如图 12 所示。

由图 12 可知,考虑功率损耗约束,当直流配电网发生单极故障时,直流线路的供电容量仍始终高

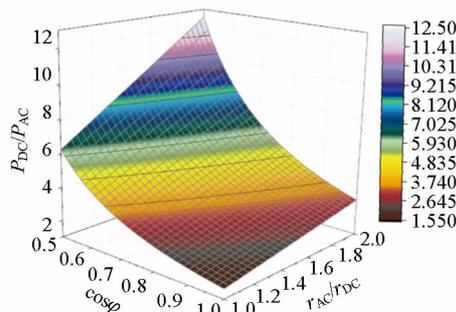


图 12 功率损耗约束下的直、交流配电网供电容量之比(发生单极故障)

于交流线路的供电容量。

## 5 算例分析

由于在 2、3、4 节已经以常见的单芯中压电缆 YJV-300 为例,对中压交直流配电网的电压损耗、功率损耗以及供电能力分别进行了对比分析,所以本节将对 2、3、4 节中计算所得的中压交直流配电网的供电能力情况进行统一的列表展示,不再进行额外的算例分析。中压交直流配电网的供电能力情况如表 2 所示。

表 2 中压交、直流配电网供电能力比较情况

配网形式	电压损耗	功率损耗	供电容量		
			最大载流量相同	电压损耗约束	功率损耗约束
交流配网	1	1	1	1	1
直流配网(正常运行)	0.158 6	0.195 5	1.603 7	6.305 2	5.115 1
直流配网(单极故障)	0.317 2	0.391 0	0.801 9	3.152 6	2.557 5

注:以交流配电网各指标值为参考值

由表 2 可知,交直流线路的最大载流量相同且直流配网发生单极故障时,中压直流配电网的供电容量小于中压交流配电网(是交流配电网的 0.801 9 倍),除此之外,中压直流配电网的供电能力都显著优于中压交流配电网的供电能力。

## 6 结束语

本文首先考虑交直流线路的过电压水平,确定了交直流配电网额定电压的关系。在此基础上对中压交、直流配电网的供电能力进行了理论推导,建

立了交、直流配电网供电能力的通用模型。以常见的单芯中压电缆 YJV-300 为例,对中压交、直流配电网的电压损耗、功率损耗以及供电容量进行了比较分析,得出了中压直流配电网的供电能力整体显著优于中压交流配电网的结论。此外,中压直流配电网发生单极故障时,分析发现其供电能力相对于交流配电网而言也有一定的优势。

### 参 考 文 献

- [1] 胡尊张,艾欣.配电网供电能力计算研究[J].现代电力,2006(3):16-20.
- [2] 裘鹏,陆翌,黄晓明,等.中压交、直流配网供电能力比较[J].电力与能源,2015(2):183-188.
- [3] 盛万兴,李蕊,李跃,等.直流配电电压等级序列与典型网络架构初探[J].中国电机工程学报,2016(13):3391-3403,3358.
- [4] 刘自发,李韦姝,韦涛,等.直流配网线路供电能力分析[J].电力建设,2014(7):80-85.
- [5] 韩民晓,陈宇,王皓界.直流配电系统电压偏差限值的研究[J].大功率变流技术,2016(3):1-5.
- [6] Stieneker M and De Doncker R W. Medium-voltage DC distribution grids in urban areas [C]// 2016 IEEE 7th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Vancouver, BC, 2016: 1-7.
- [7] 崔福博,郭剑波,荆平,等.直流配电技术综述(英文)[J].电网技术,2014(3):556-564.
- [8] 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(6):64-73.
- [9] 李梦渔.基于改进层次分析法的交、直流配电网综合评估[D].北京:华北电力大学,2015.
- [10] 郑欢.柔性直流配电网的若干问题研究[D].杭州:浙江大学,2014.
- [11] Borioli E, Brenna M, Faranda R et al. Comparison between the electrical capabilities of the cables used in LV AC and DC power lines [C]// 2004 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power (IEEE Cat. No. 04EX951), 2004: 408-413.
- [12] Nilsson D, Sannino A. Efficiency analysis of low-and medium-voltage DC distribution systems [C] // Power Engineering Society General Meeting. IEEE Xplore, 2004, 2: 2315-2321.
- [13] 电机工程手册编辑委员会.电机工程手册[M].北京:机械工业出版社,1996.
- [14] 韩民晓,文俊,徐永海.高压直流输电原理与运行[M].北京:机械工业出版社,2009.
- [15] 许烽,徐政.基于三线双极结构的扩展式多端直流系统建模与特性分析[J].电力系统自动化,2014(13):145-152.
- [16] 吴子怡,周唯.±500kV永富直流输电工程分极送电接地方案造价分析[J].四川电力技术,2014(6):32-35.
- [17] 李庚银,栗然,杨淑英.电力系统分析基础[M].北京:机械工业出版社,2011.
- [18] GB 12325 1990.电能质量供电电压允许偏差[S].1990.

收稿日期:2017-09-06

作者简介:

曹文远(1994—),男,硕士研究生,研究方向为直流配电网, E-mail: 18173528776@163.com;

韩民晓(1963—),男,教授,博士生导师,研究方向为电力电子在电力系统中的应用, E-mail: hanminxiao@263.net;

谢文强(1993—),男,博士研究生,研究方向为直流微电网, E-mail: bxiewenqiang@163.com;

李蕊(1978—),女,高级工程师,研究方向为直流配电及电力系统运行分析, E-mail: lirui@epri.sgcc.com.cn.

(责任编辑:林海文)