

## 摘 要

风力发电作为一种清洁的可再生能源发电方式,已越来越受到世界各国的欢迎,与此同时,风电场设计也备受重视。虽然风电场电气设计与传统电厂设计的原理相同,但传统的设计方法并不一定适合风电场设计。所以有必要进行专门针对风电场电气主接线设计的研究。

风电场的电气设计主要包含几个方面:风力发电机组升压方式、风电场集电线路选择、风机(风电机组)分组及连接方式。现国内外风力发电机组出线电压多为 690V,多采用升至 35kV 方案。风电场集电线路方案一般采用架空线或电缆敷设方式。架空线的成本较低,但可靠性较低,电缆的成本高,可靠性也高;集电线路结构有 4 种常用方案,链形结构;单边环形结构;双边环形结构;复合环形结构。链形结构简单,成本不高。环形设计成本较高,但其可靠性较高。风力发电机分组多为靠风机的排布位置、及结合现场施工的便捷性制定。

作者主要针对风电场电气主接线进行设计和优化,通过对风机的分组和连接方式、风电场集电线路方案、风电场短路电流计算及设备选取等的问题进行深入的计算与讨论,提出一些关于风机分组连接、集电线路设计的可行方案。并通过现有风电场的数据,对方案进行技术和经济方面的比较,确定最终方案并对其进行优化。为今后的风电场设计提供一些经验和参考意见,便于今后找出一套适用于风电场电气主接线设计的方法。

关键词: 风电场, 电气设计, 集电系统, 优化

## ABSTRACT

By the wind power as one kind of clean renewable energy source the electricity generation way, the design of wind farm has been popular and been paid attention to with the world. Although the electrical design of wind farm and the traditional design technology at the electrical principle is the same, but sometimes the methods are not suitable in fact. So specifically for the electrical design of wind farm has come into being.

The electrical design of wind farm mainly includes several aspects: wind turbine generators, wind energy booster way of electrical collector system, WTGS's group and connection. Now the WTGS's voltage qualifies for 690V, and much taking the voltage to 35kV. Wind farm electrical collector system generally uses the bus or cable. The cost of bus is relatively lower, but reliability is low, cable is high costs and high reliability; The electrical collector system has four common solutions, string clustering; Unilateral redundancy clustering; Bilateral redundancy clustering; Composite redundancy clustering. String clustering is simple structure, cost is not high. With redundancy design cost is higher, but it has high reliability. For more on WTGS group and combining lay on its location and the convenient of building.

We will discuss about the main points of the wind farm electrical design and optimized. It will get some design which is about the grouping and connection and the connection lines that can be used, by calculating and discussing, include the grouping and connection of the WTGS, the connection lines, the wind farm electrical short-circuit current computation , the equipment selection and so on. We will compare different schemes from the economic and technical aspects based on exciting wind farm data, then optimizing and being sure these plans. These conclusions and viewpoints can be references for the future wind farm design, and be easy finding out a set of way to be suitable the electrical design of wind farm.

**KEY WORDS:** Wind farm, electrical design, electrical collector system, optimization

# 目 录

摘 要 .....	1
ABSTRACT.....	II
第 1 章 绪论 .....	3
1.1 研究背景 .....	3
1.2 研究意义 .....	4
1.3 国内外研究现状 .....	4
1.4 本文主要内容 .....	5
第 2 章 风场介绍及主要设备选型 .....	6
2.1 风电场基本资料 .....	6
2.2 电气主接线设计 .....	6
2.3 主要设备选型 .....	8
2.3.1 风电机组的选型 .....	8
2.3.2 风机箱变的选型 .....	8
2.3.3 主变压器的选型 .....	9
第 3 章 风电场接线方案比选 .....	11
3.1 概述 .....	11
3.2 集电线路方案比选 .....	11
3.2.1 方案描述及比较 .....	11
3.2.1.1 技术特点 .....	11
3.2.1.2 经济比较 .....	12
3.2.2 结论 .....	13
3.3 风机分组和连接方案的比选 .....	13
3.3.1 方案描述 .....	13
3.3.2 方案比较 .....	13
3.3.2.1 技术比较 .....	13
3.3.2.2 经济比较 .....	21
3.3.3 结论 .....	21

3.4 本章小结 .....	22
<b>第 4 章 短路电流计算及其它电气设备的选取</b> .....	<b>23</b>
4.1 计算说明 .....	23
4.2 系统等效简化图 .....	23
4.3 短路电流的计算 .....	24
4.3.1 各元件的标么值 .....	24
4.3.2 各短路点的短路电流计算 .....	24
4.4 其它电气设备的选取 .....	26
4.4.1 断路器的选取 .....	26
4.4.2 隔离开关的选取 .....	28
4.4.3 电压互感器的选取 .....	28
4.4.4 电流互感器的选取 .....	28
4.5 本章小结 .....	30
<b>第 5 章 方案优化</b> .....	<b>31</b>
5.1 概述 .....	31
5.2 风机分组的优化 .....	31
5.2.1 技术比较 .....	31
5.2.2 经济比较 .....	34
5.2.3 结论 .....	34
5.3 线路优化 .....	35
5.3.1 线路的选择 .....	35
5.3.2 技术比较 .....	35
5.3.3 经济比较 .....	38
5.3.4 结论 .....	38
5.4 本章小结 .....	39
<b>结    论</b> .....	<b>40</b>
<b>参考文献</b> .....	<b>41</b>
<b>附    录</b> .....	<b>42</b>
<b>致    谢</b> .....	<b>45</b>

# 第 1 章 绪论

## 1.1 研究背景

风能是一种无污染的、储量丰富的可再生能源。随着全球环保问题的日益突出,传统化石能源供应的日趋紧张,风力发电作为一种清洁的可再生能源的发电方式,也是新能源发电技术中最成熟和最具规模开发条件的发电方式之一,已越来越受到世界各国的欢迎和重视。在过去的 5 年间,风电发展不断超越其预期的发展速度,而且一直保持着世界增长最快能源的地位。2005 年以来,全球风电累计装机容量年平均增长率为 27.3%,新增装机容量年平均增长率为 36.1。根据丹麦 BTM 咨询公司报告,2009 年全球有超过 3810.3 万 kW 的新增装机容量并入电网,营业总额达到 500 亿欧元。截至 2009 年底,全世界风电累积装机总容量约为 1.6 亿 kW,同比上年增长 31%。目前,风电的年发电量约 3400 亿 kWh,风力发电量已经占到世界总发电量的 2% 以上。在累计装机容量上,欧洲仍然是风力发电市场的领导者,截至 2009 年底,其累积装机总容量为 7655.3 万 kW,占全世界风电总装机的 47.9%,提前超额完成了到 2010 年风电装机容量达到 4000 万 kW 的目标。但是,在 2009 年新增装机容量方面,欧洲只占 28.2%,北美洲达到 39.3%,亚洲达到 30%,欧洲已经失去其领先的地位了。目前,德国、西班牙和意大利三国的风电机组的装机容量约占到欧洲总量的 65%。近年来,在欧洲大力发展风电产业的国家还有法国、英国、葡萄牙、丹麦、荷兰、奥地利、瑞典、爱尔兰。欧洲之外,发展风电的主要国家有美国、中国、印度、加拿大和日本。迄今为止,世界上已有 82 个国家在积极开发和应用风能资源。风电在未来 20 年内将是世界上发展最快的能源。随着我国风电产业优惠和激励政策的相继出台以及 2006 年 1 月 1 日《可再生能源法》的颁布实施,风力发电得到了飞跃发展。截至 2009 年底全国风电装机容量已超过 2500 万千瓦,连续三年增长率超过 100%,2010 年中国新增风电装机容量 18927.99 兆瓦,累计风电装机容量 44733.29 兆瓦,双居全球第一位。

但我国风力发电事业的发展只是近几年的事情,且相应的风电场电气设计也是在近几年才真正发展起来,因此还不成熟。与传统的电场设计相比,风电场电气设计并没有完全统一详细的规程规范,仅有一部风电场接入电力系统技术规定(征求意见稿)作为参考。虽然风电场电气设计与传统的电场设计,在电气原理上是相同的,但是实际工程设计的时候又有所不同。风电场电气设计有很多设计方法由于没有经验可参照,都是按照传统电场设计的方法进行设计,且由于风电

场与传统电场的区别,这些设计方法并不一定适合。在这种情况下,风电场设计的工作量却还在快速增长当中。因此很多设计单位的风电场设计工程的数量都在增加,有些设计院甚至专门设立了新能源设计部门,专门负责风电的设计。很多之前没有接触过风电的设计人员,都加入到风电设计的队伍中[8]。因此,也造成了各地风电场的电气主接线设计良莠不齐,无规可循。

## 1.2 研究意义

风电场电气设计方面水平的提高和发展,对于风电事业建设进一步发展有着重大的意义,其主要表现在以下几个方面:

(1) 风电场的选址、风机安装点的选址主要是从风资源的角度去考虑,而关于风电场内的电气接线方案、风机布置方案的研究可为其提供参考因素;

(2) 为风电场的风力发电机的选型提供参考;

(3) 现已设计的许多风电场的风机分组、接线方式都采用了比较直观的方案,但缺乏经济性、可靠性方面的综合考虑和比较。风机分组、接线的讨论为今后的设计提供多种参考方案,有利于设计时择优选取。

且风电大规模、迅速的建设,要求风电场的设计尽快成型,从而减少工程建设进度与设计进度的矛盾,加快风电场建设的速度,提高工程建设和管理的效率。从而再在这一基础上,对一些以往的风电场电气设计方案加以优化,从而加快风电这一行业的发展。

## 1.3 国内外研究现状

风电场电气主接线的设计主要分以下几个方面:风力发电机组升压方式、风电场集电线路选择、风力发电机分组及连接方式、风电场无功补偿及等。

风力发电机组升压:现国内外风力发电机组出线电压多为 690V,若直接汇总并接入风电场的总升压站,则电能损耗过大,且导体的截面过大,无法满足现场的安装要求,因此,须将电压升高至 35kV 或 10kV 才能接入总升压站。但从年运行费用上比较,在经济输送容量的范围内,35kV 方案线损较小,且维护工作较少。因此,现国内外风力发电机组升压多采用 35kV 方案[3]。国外也有实验将风机直接升压至 110KV,不经过整个电厂的主变整合而电网相连接。但是这样的结果却是会导致风机的频繁离并网,最终,使得风机的总发电量降低,电品质下降,风电上网困难[16]。

风电场接线集电线路结构共有 5 种常用方案，链形结构；单边环形结构；双边环形结构；复合环形结构；星形结构[15]。链形是已建风电场中用的最多的一种连接方法，结构简单，成本不高，其基本思想是将一定数目的风力发电机（包括其附带升压变压器）连接在一条电缆之上。主要问题是每条链上的风机数目受到地理位置、电缆长度、电缆容量等参数限制。环形设计比链形需要的电缆规格更高、长度更长，因此成本较高，但因其能实现一定程度的冗余，可靠性较高。其中，单边环形结构是将链形中每串尾部的风力发电机通过电缆接回汇流母线；双边环形结构是将链形中两相邻串的尾部风力发电机相连；复合环形结构是将单边和双边两种环形相结合并改进的一种结构[8]。

风电场集电线路选择方面，集电线路方式一般采用架空线或电缆敷设这两种。由于风电场年利用小时数较低，检修线路对发电量造成的损失较小，在考虑建设成本、施工难度、运行成本等诸多因素后，大多风电场集电线路均选用架空线时接线方案链形结构。但介于我国的相关规定及现状，现多采用电缆敷设方案。

风力发电机分组多为靠风机的排布位置、及结合现场施工的便捷性制定。大多数情况下，要尽量使风机均匀的分部到各个集电之路上，以免造成风场运转时由于各条支路电量不均而造成的冲击[14]。合理的进行风机分组可以使风电场电缆或架空线等导体投资尽量节省，使主接线方案优化。

风电场无功补偿：在目前已经建成和在建的风电工程中，35kV 母线无功补偿方式主要有，固定投切电容器组补偿方式及降压式动态无功补偿方式。在工程造价允许的前提下大多优先选用静止无功补偿装置方式[2]。

## 1.4 本文主要内容

本文在通过对某一风电场电气方面的设计及其所面临的困难、研究意义等内容的基础上，对风电场电气设计的几个重要部分进行了讨论和研究，其中主要包括以下部分内容：

- (1) 确定风场，所布置的机型，主接线形式及主变；
- (2) 讨论了风电场集电线路的方案，并从经济和技术上进行比较；
- (3) 讨论了风电场风机的分组和连接方案，并从经济和技术上进行比较；
- (4) 进行了短路电流的计算，用以选择和校验所选电气设备的相关参数；
- (5) 提出可行的优化方案并与原方案从经济和技术上进行比较。

## 第 2 章 风电场介绍及主要设备选型

### 2.1 风电场基本资料

中华协合贡宝拉格风力发电场位于内蒙古太仆寺旗正南方向 17 公里处，中心位置为北纬  $41^{\circ} 47' 654''$ 、东经  $115^{\circ} 16' 110''$ ，海拔高度 1470-1557 米，年平均风速 7.6m/s。风电场处于中温带，属亚干旱大陆气候，冬季漫长而寒冷，夏天凉爽而短促。

现设计风电场使用 1.5MW 双馈型风力发电机组 33 台，总装机容量 49.5MW，风电场集电采用 35KV 线路，分布在大约 30 平方公里的丘陵上，33 台风电机组设计分五个集电回路，线路总长约 28 公里。风电场有 110KV 升压站一座，主变压器为容量 63000KVA，电能输出采用 110KV 架空线路。电能由风电场升压站经太仆寺旗包场变电站往明安图中心变电所送出。

### 2.2 电气主接线设计

鉴于风电场的容量较少，且配有一个主变的情况，宜选用单母线接线方式。此方式有着接线简单清晰，设备少，操作简单和便于扩建的优点，适用于此电场的主接线设计方式。电厂的主接线图如下：



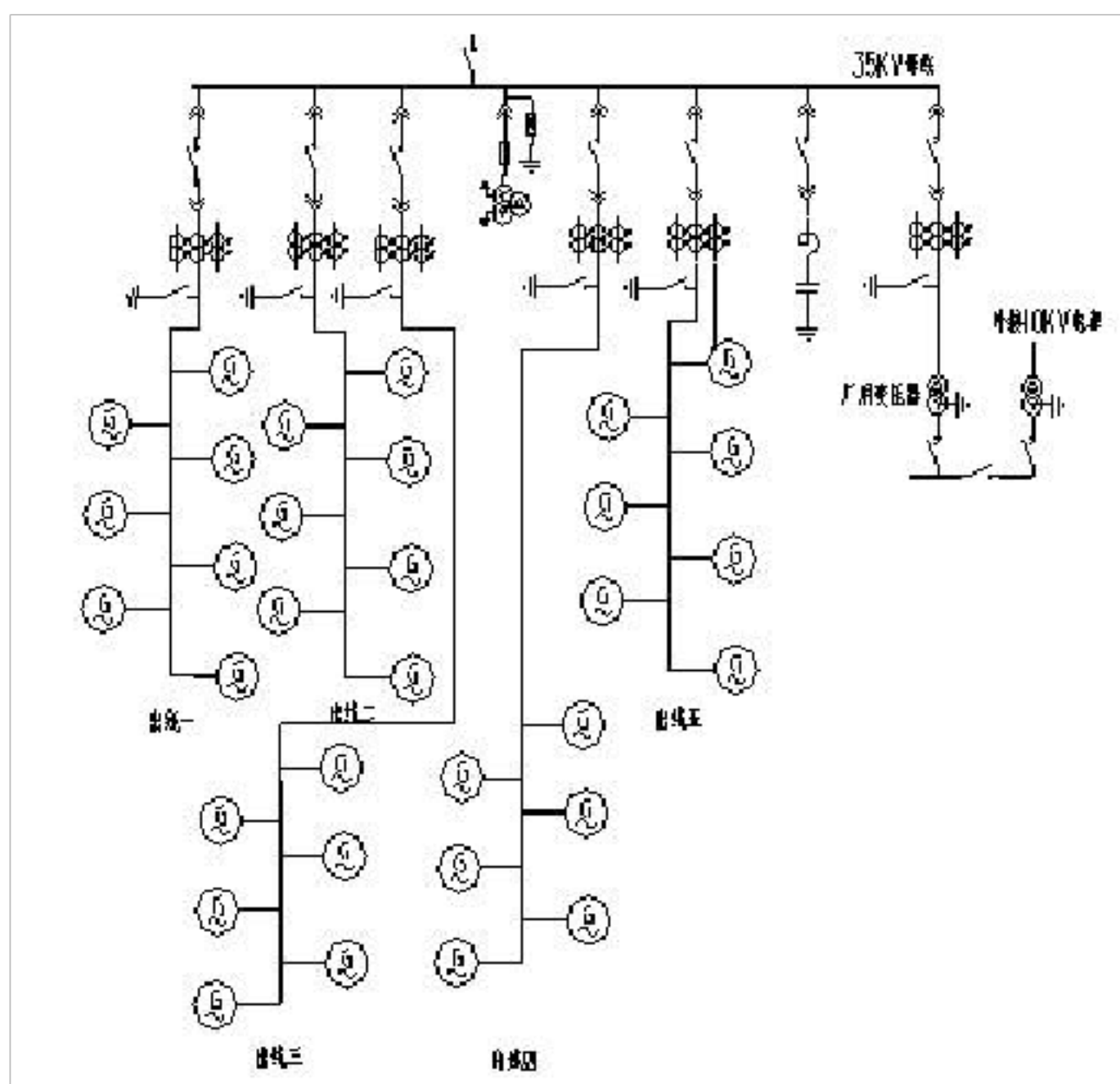
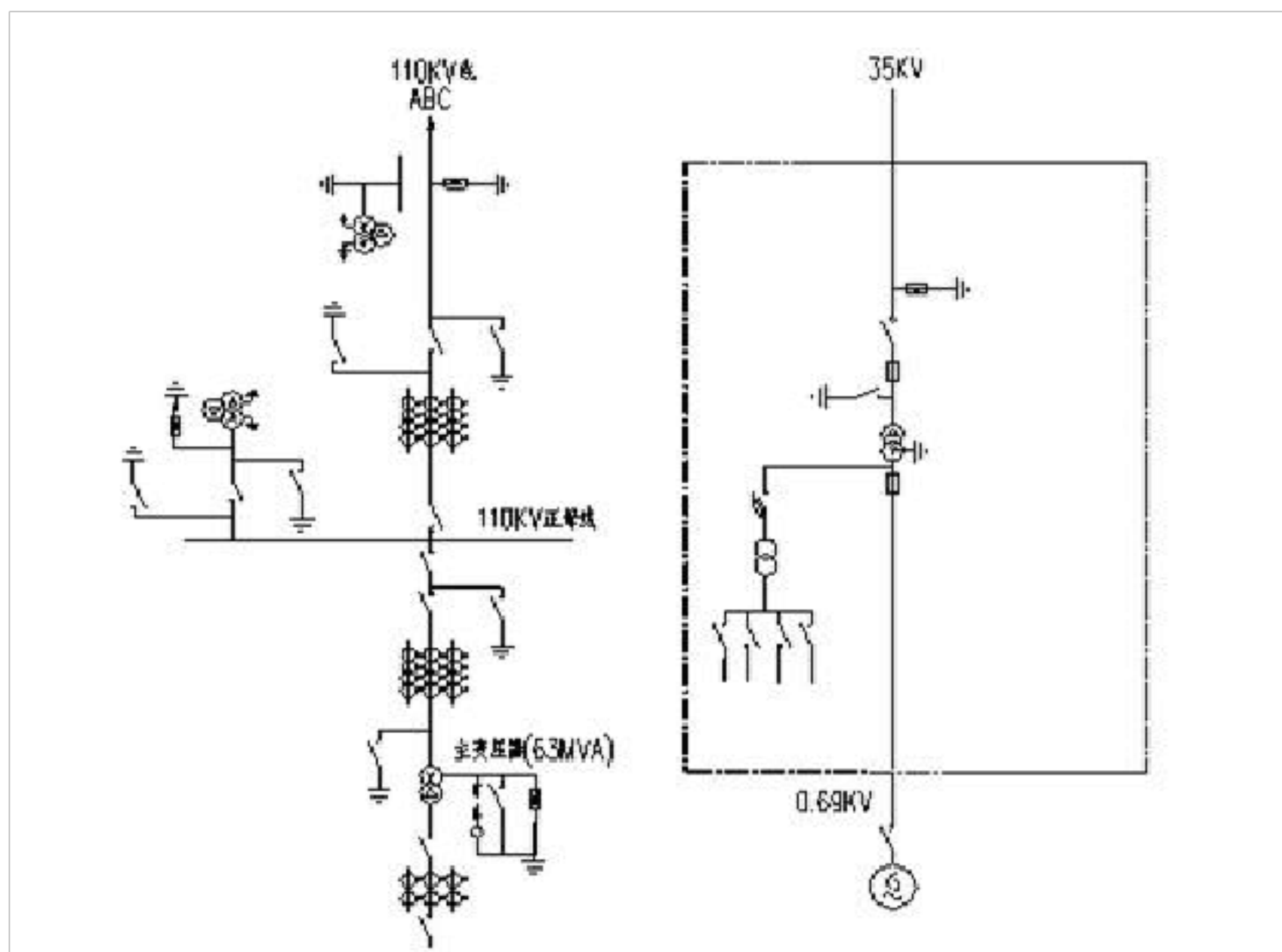


图 2-1. 主接线图

## 2.3 主要设备选型

### 2.3.1 风电机组的选型

现选择由中国南车集团出产的 YFF06 型 1.5MW 风冷双馈风力发电机, 具体数据如下:

YFF006型1.5MW风冷双馈风力发电机	
主要技术参数	
额定功率:	1560kW
额定效率:	97%
冷却方式:	IC616
定子/转子额定电压:	690V/417V
定子/转子额定电流:	1091A/391A
定额类型:	S1
定子输出频率:	50Hz
转子开路电压:	2018V
额定转速:	1800 r/min
定/转子接线方式:	Δ/Y
重量:	7300kg
发电机防护等级:	IP54
滑环防护等级:	IP23
绝缘等级:	H
运行转速范围:	1000~2000 r/min
运行环温:	-30~40℃

### 2.3.2 风机箱变的选型

风机出口电压为 690V, 所以需要为风机提供一变压器以达到集电线路的额定电压, 具体数据如下:

表 1. 风力发电机箱变参数

型号	S11-M-1500/35	容量	1500kVA	电压	35000v/690v
产品代号	OHT.710.923	频率	50Hz	相数	三相
联结组标号	Dyn11	冷却方式	ONAN	使用条件	户外
绝缘水平	L1200A95/AC5	短路阻抗	6.26%	器身重	2270Kg

出厂序号	BY0909023		标准代号	GB1094.1~2-1996、GB1094.3-2003 GB1904.5-2003、GB/T6451-2008			
分接位置	高压	电压 V	38588	37669	36750	35831	34912
		电流 A	15.7				
	低压	电压 V	690				
		电流 A	836.74				

### 2.3.3 主变压器的选型

风电场的总容量为 49.5MW. 所接电网电压为 110KV, 以此数据选择主变压器, 具体数据如下:

表 2. 风电场主变压器参数

型号	SFZ10-63000/110		相数	3 相		频率	50.00HZ		户外使用	
额定容量	63000kVA		额定电压	110/35kV		冷却方式	ONAN/ ONAF (70%/100%)			
联结组标号	YNyn0		产品代号	1TB.714.0058.1		出厂序号	A20098T22-1			
出厂日期	2009.08		变压器油牌号	DB-45		标准序号	GB1094			
器身重	43.6 t	上节油箱重	5.6 t	油重	21.6 t	运输重	68.9 t	总重	83.2 t	
绝缘水平	h.v.线路端子		LI/AC	480/200 KV						
	h.v.中性点端子		LI/AC	325/140 KV						
	I.v.线路端子		LI/AC	200/85 KV						
	I.v.中性点端子		LI/AC	200/85 KV						
空载电流			空载损耗			负载损耗				
0.124%			40.7KW			237.0KW				

短路阻抗%		
最高电压分接	额定电压分接	最低电压分接
10.63	10.18	10.02

## 第 3 章 风电场接线方案比选

### 3.1 概述

此次设计的模拟风电场的容量较小，但由于风电的特殊性，风电场接入电网对系统的影响也不可小觑。因此在这些风电场，风力发电升压系统要求具有高度的可靠性，风电场不可随意接入电网或与电网断开连接，机组无论在起动、正常运行或事故停机时，都应尽量缩小影响范围，以确保其它机组的正常运行。

该风场为内陆风电场，属于丘陵地带，风机多部于矮山之上。不同于沿海风电场风场的风机沿海岸线狭长的布置方式，风机的布置十分分散，大部分风机距风电场升压站较远，有的甚至达到几公里。而风电场风机台数较多、布置分散的特点，决定了风电场集电系统设计的特殊性，即需根据风电场的装机规模确定采用一级升压或经过两级升压，风电场需设置集电线路，风机的分组和布置也有多种方案。

### 3.2 集电线路方案比选

#### 3.2.1 方案描述及比较

风电场的风机至中心升压站之间的集电线路有电缆和架空线两种方案可供选择，下面将从经济和技术两个方面对这两种方案进行比较。

##### 3.2.1.1 技术特点

架空线：

- (1) 由于采用架空线，导线裸露在空气中，受周围环境影响较大，可靠性较低；
- (2) 架空线对地电容较小，发生单相接地故障时，电容电流较小，并且发生单相接地故障通常以瞬时故障为主，因此可以采用中性点不接地或采用消弧线圈接地方式，以减少机组无为跳闸的可能性；
- (3) 架空线相同截面导线载流量比电缆大得多，如此次设计采用架空线则导线截面积可以选的较小。

但是在一些地区如沿海风电场由于海风较大，采用架空线方案时对铁塔的要

求较高, 造价也增加较大, 可靠性也有所下降. 还有在一些地区牵涉到视觉观赏性等, 也必须采用电缆。

电缆:

- (1) 电缆由于埋设在地下, 不受周围环境影响, 可靠性较高;
- (2) 电缆对地电容较大, 发生单相接地故障时, 电容电流较大, 并且发生单线接地故障通常以永久故障为主, 因此不可以采用中性点不接地方式, 只能采用消弧线圈接地或电阻接地方式, 无形中降低了可靠性;
- (3) 电缆相同截面导线载流量比架空线小得多, 如本设计采用电缆则导线截面积要大一些, 且需选择三根电缆

### 3.2.1.2 经济比较

(1). 导线的选择

线路正常工作电流:

$$I_g = \frac{S}{\sqrt{3}U_N} = \frac{10500}{\sqrt{3} * 35} = 173.205 \text{ A}$$

由于最大负荷年利用小时少于 2000h,  $J=1.76$  (架空线) (1.27, 电缆),

$$S_{J1} = \frac{I_g}{J} = \frac{173.205}{1.76} = 98.412 \text{ mm}^2$$

$$S_{J2} = \frac{I_g}{J} = \frac{173.205}{1.27} = 136.382 \text{ mm}^2$$

故, 架空线选择导线为 35KV LGJ-120 型, 查得允许电流为 380A, 正常允许的最高温度为  $90^\circ\text{C}$ ,  $r=0.263 \ \Omega/\text{km}$ ,  $x=0.200 \ \Omega/\text{km}$ ;

电缆选择为 35KV YJLV22-3\*50 型, 查得允许电流为 271A, 正常允许的最高温度为  $60^\circ\text{C}$ ,  $r=0.641 \ \Omega/\text{km}$ ,  $x=0.12 \ \Omega/\text{km}$ 。

现计算得到架空线载流修正系数:

$$K_\theta = \sqrt{\frac{70-20}{70-25}} = 1.054$$

$$\therefore K_\theta * I_{at 25^\circ\text{C}} = 1.054 * 281 = 296.174 \text{ A} > 173.205 \text{ A}$$

$$\theta = \theta_0 + (\theta_{at} - \theta_0) \left( \frac{I}{I_{at}} \right)^2 = 37.1^\circ\text{C} < 70^\circ\text{C}$$

满足长期发热要求

现计算得到电缆载流修正系数:

$$K_{\theta} = \sqrt{\frac{60-20}{60-25}} = 1.07$$

现采用电缆直埋的敷设方式, 电缆的载流量修正系数  $K_4 = 0.8$ , 因土壤热阻系数为标准值, 故修正系数  $K_3 = 1$

$$\therefore K_{\theta} K_3 K_4 * I_{al25^{\circ}C} = 1.07 * 1 * 0.8 * 138 * 3 = 354.384 A > 173.205 A$$

$$\theta = \theta_0 + (\theta_{al} - \theta_0) \left( \frac{I}{I_{al}} \right)^2 = 29.555^{\circ}C < 70^{\circ}C$$

满足长期发热要求

价格方面:

(1) 35KV 架空线 28Km(导线为 35KV LGJ-120), 约 30 万元/Km, 总造价约为 840 万元;

(2) 35KV 电缆 28Km(型号为 35KV YJLV22-3\*50), 约 90 万元/Km, 总造价约为 2520 万元;

由此可见, 电缆方案远比架空线方案价格要高

### 3.2.2 结论

(1) 架空线方案经济上优越得多, 技术上也可以达到要求, 且鉴于此次地形所限, 所以作为推荐方案;

(2) 电缆方案需要较大投资, 但在一些设计中则优先考虑此方案, 如: 沿海风场, 海上风场及风力影响较大的地区。

### 3.3 风机分组和连接方案的比选

根据该风电场的现场情况及平均分组的原则, 现将风机分为 5 组。3 组为 7 台, 另两组为 6 台。

### 3.3.1 方案描述

风电场的风机排列各异,有阵列布置,也有线性布置,合理选择风机分组和风机连接型式,可以使风电场电缆或架空线等导体投资尽量节省,是主接线方案优化。

风电场的风机分组及连接方式影视情况而定。从陆上风电场和海上风电场的设计经验来看,连接方式基本上有链形(放射形)、星形和环形三种。又因星形的造价过高,故此处不予考虑。

#### 1) 放射形布局

如图 (a) 所示,将若干风力发电机连接在同一条输电线路,整个风电场的电能通过若条输电线路输送到汇流母线上,输电线路的额定功率须大于所连接风机的最大功率。该布局的优点是操作简单、投资成本较低;缺点是可靠性不高,如果输电线路的某处发生故障,那么整条输电线路都将被迫切除,与其相连的所有风机都将停运。

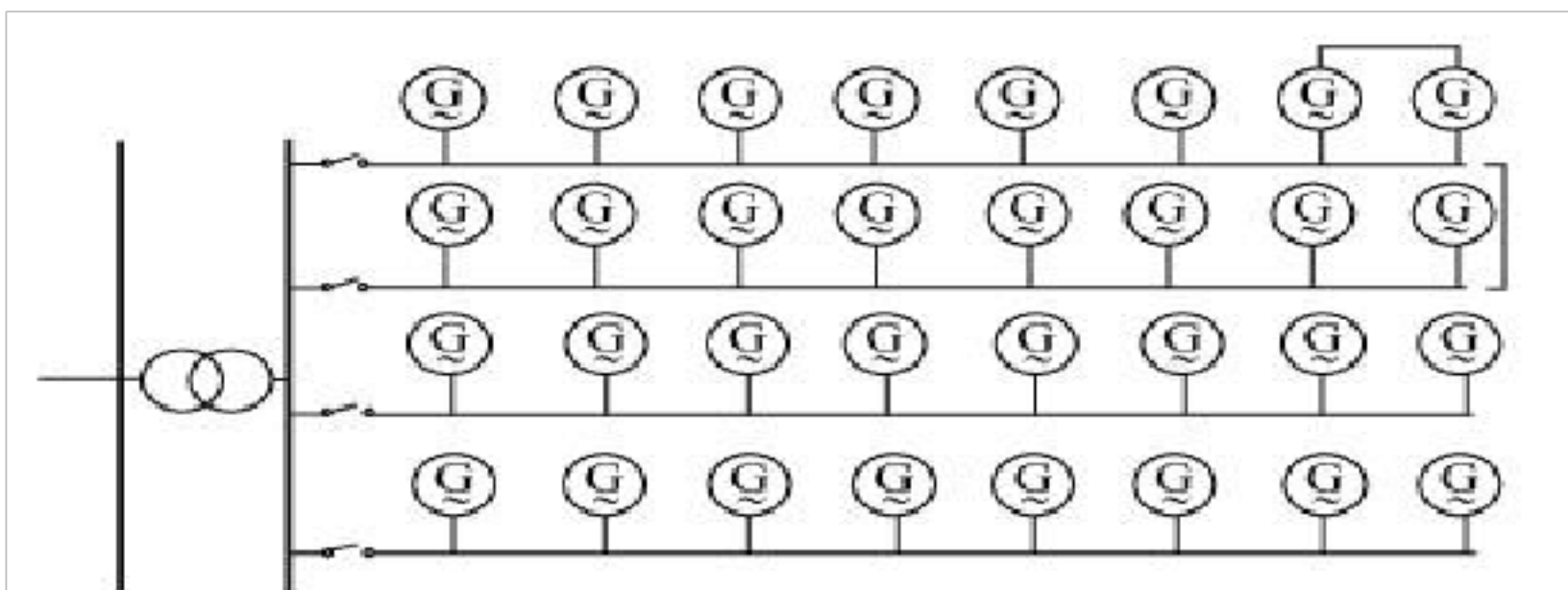


图 3-1 (a)放射形布局

#### 2) 单边环形布局

如图 (b) 所示,在放射形布局的基础上,通过一条冗余的输电线路将线路末端的风机连回到汇流母线上。如果输电线路某处发生故障,可以通过加装在其上的开关设备切除,保证风机正常运行。该布局的优点是可提高内部电气系统的可靠性;缺点是操作比较复杂,投资成本较高。



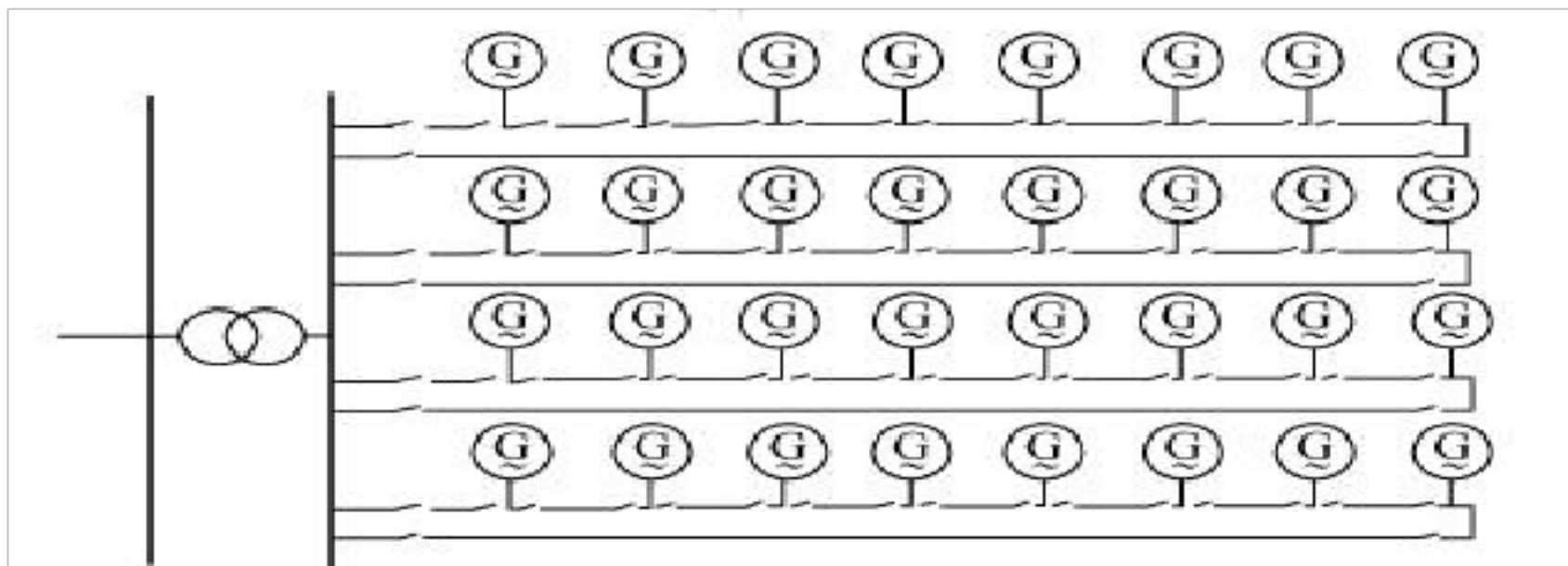


图 3-1 (b) 单边环形布局

### 3) 双边环形布局

如图 (c) 所示, 在放射形布局的基础上经一条冗余的输电线路将两条相邻线路末端的风机相连。因输电线路连接的风机数量加倍, 故其额定功率也需要加倍。该布局的优缺点与单边环形布局基本相同。

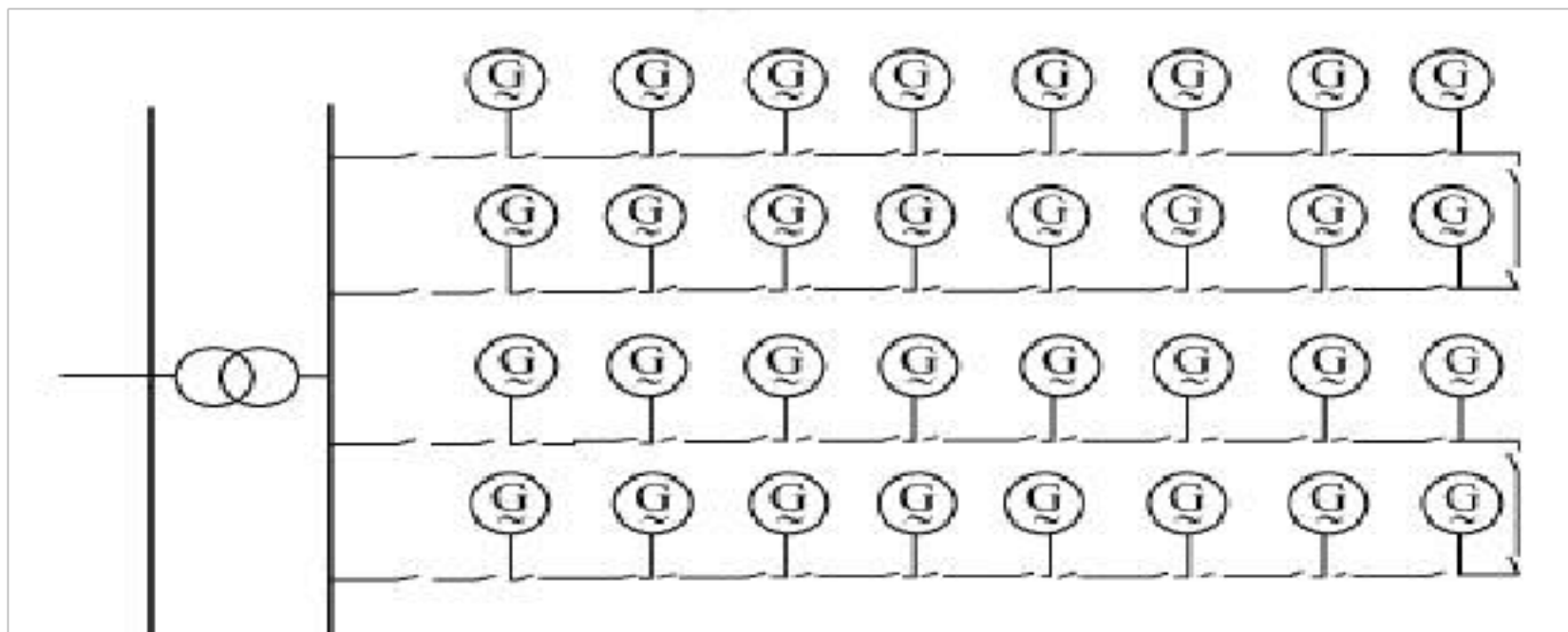


图 3-1 (c) 双边环形布局

### 4) 复合环形布局

如图 (d) 所示, 将单边环形与双边环形进行结合, 将相邻几条输电线路末端的风机互连, 然后经一条冗余的线路将末端的风机连回到汇流母线上。该布局相比单边环形可以减少冗余线路的数量, 相比双边环形可以降低其额定容量。

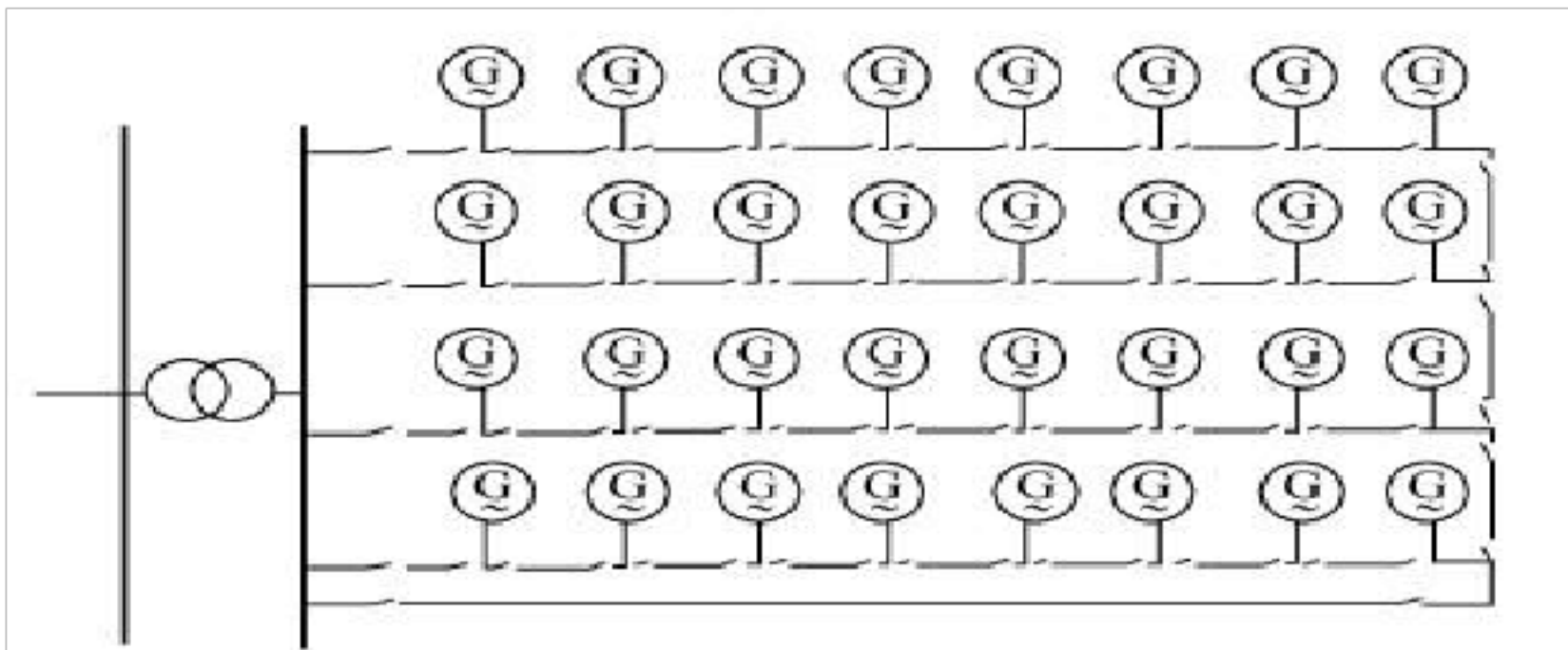


图 3-1(d) 复合环形布局

### 5) 多边环形布局

由以上几种布局可以看到, 环形布局提高可靠性的途径有提供冗余和增加互连 2 个。本文根据这一原则提出多边环形布局, 如图 (e) 所示。该布局将所有输电线路末端的风机用线路连在一起, 以增加风机互连。该布局要求输电线路的额定容量比放射形布局中线路的额定容量稍大, 以满足某一输电线路故障处下游风机通过其余输电线路输送电能。该布局与复合环形相比不需要冗余线路, 但是所需线路的额定容量稍大。

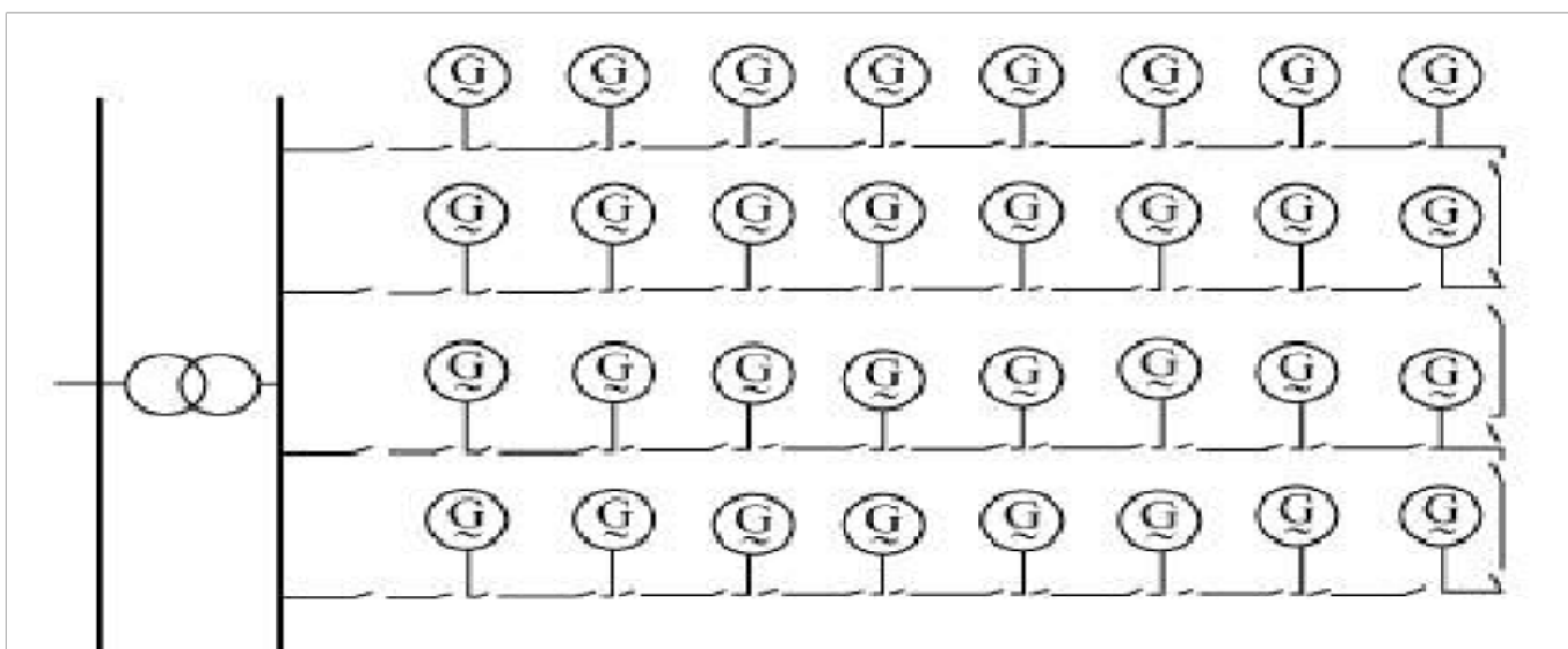


图 3-1(e) 多边环形布局

## 3.3.2 方案比较

### 3.3.2.1 技术比较

变压器铭牌参数:

$$S_N = 63000kva \quad U_{1N} / U_{2N} = 110 / 35KV \quad \Delta P_{KN} = 237.0KW$$

$$\Delta P_o = 40.7 KW \quad U_K \% = 10.18 \quad I_o \% = 0.124$$

变压器计算参数：

$$R_T = \frac{\Delta P_{KN} U_2}{1000 S_N^2} = \frac{237 * 110^2}{1000 * 63^2} = 0.723 \Omega$$

$$X_T = \frac{U_K \% U_2}{1000 S_N} = \frac{10.18 * 110^2}{100 * 63} = 19.552 \Omega$$

$$G_T = \frac{\Delta P_o}{1000 U_2^2} = \frac{40.7}{1000 * 110^2} = 3.364 * 10^{-6} S$$

$$B_T = \frac{I_o \% S_N}{100 U_2^2} = \frac{0.124 * 63}{100 * 110^2} = 6.456 * 10^{-6} S$$

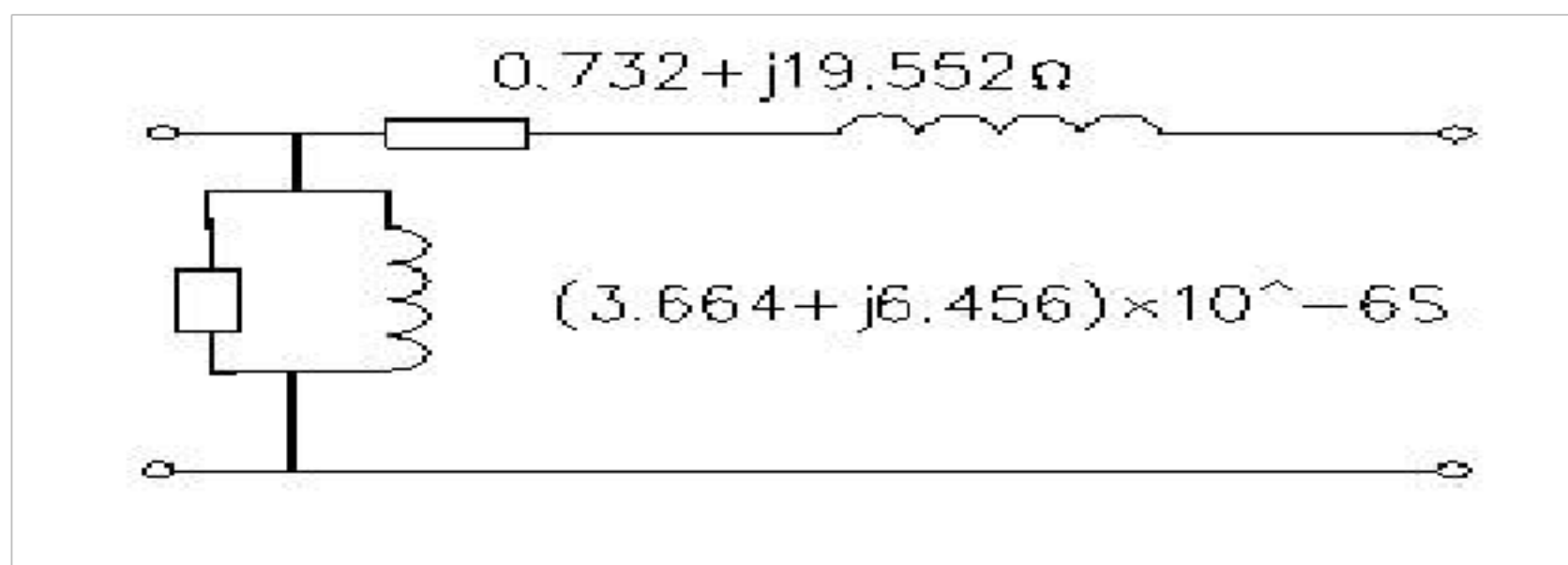


图 3-1. 等效电路

线路计算采用等效简化法, 具体方法见附录 A.

现比较两种方案的有功, 无功损耗及电压偏差值:

(1) 线路参数(链式):

$$r = 0.263 \Omega/km \quad x = 0.2 \Omega/km \quad l = 5.6 Km$$

$$R = r * l = 0.263 * 5.6 = 1.473 \Omega$$

$$X = x * l = 0.2 * 5.6 = 1.12 \Omega$$

由于线路长度小于 100Km, 故不计线路电纳的影响。

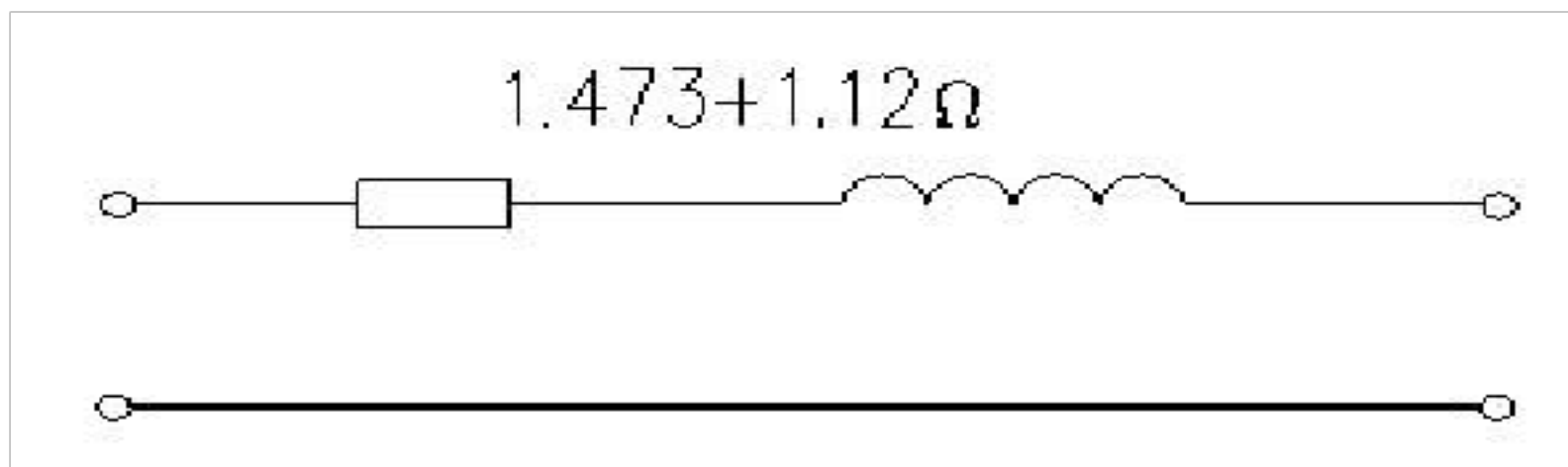


图 3-2. 等效电路

因此

已知:当该段线路布置为 7 台风机时线路损耗为

$$S_1 = 10.5MVA$$

$$\Delta S_{L1} = \left(\frac{S_1}{U_A}\right)^2 (R_L + jX_L) = \frac{10.5^2}{35^2} (1.473 + j1.12) = 0.132 + j0.101MVA$$

当该段线路布置为 6 台风机时线路损耗为

$$S_2 = 9MVA$$

$$\Delta S_{L2} = \left(\frac{S_2}{U_A}\right)^2 (R_L + jX_L) = \frac{9^2}{35^2} (1.473 + j1.12) = 0.097 + j0.074MVA$$

线路总损耗为:

$$\Delta S_L = \Delta S_{L1} * 3 + \Delta S_{L2} * 2 = 0.59 + j0.451MVA$$

线路末端的输出功率为:

$$S_L = S_f - \Delta S_L = 48.91 - j0.451MVA$$

线路侧电压分布:

$$\Delta U_L = \frac{P_L R_L + Q_L X_L}{U_L} = \frac{10.5 * 1.473}{35} = 0.442KV$$

$$\therefore U_L = 34.558KV$$

变压器内的功率损耗为:

$$\Delta S_T = \Delta P_T + j\Delta Q_T = \left(\frac{S}{U_B}\right)^2 (R_T + jX_T)$$

$$= \frac{(48.91^2 + 0.451^2)}{110^2} (0.723 + j19.552) = 0.143 + j3.866MVA$$

由于变压器侧电纳影响：

$$\Delta P_{xT} = G_T U_2^2 = 0.041MVA$$

$$\Delta Q_{xT} = B_T U_2^2 = 0.078MVA$$

变压器的损耗为：

$$\Delta S'_T = 0.184 + j3.944MVA$$

总输出电量为：

$$\therefore S_T = S_L - \Delta S'_T = 48.726 - j4.395MVA$$

变压器电压压降(不计 $\sigma U_T$ )：

$$\Delta U_T = \frac{P'_T R_T + Q''_T X_T}{U_1} = \frac{48.726 * 0.723 + 4.395 * 19.552}{110} = 1.102KV$$

所以，变压器高压侧电压为：

$$U_L = 34.558 * \frac{U_{1N}}{U_{2N}} - \Delta U_T = 107.509KV$$

(2) 线路参数(单边环)：

$$r = 0.263\Omega/km \quad x = 0.2\Omega/km \quad l = 5.6Km$$

$$R' = r * l = 0.263 * 5.6 = 1.473\Omega$$

$$X' = x * l = 0.2 * 5.6 = 1.12\Omega$$

$$\therefore R = \frac{3}{8} R' = 0.552\Omega$$

$$X = \frac{3}{8} X' = 0.42\Omega$$

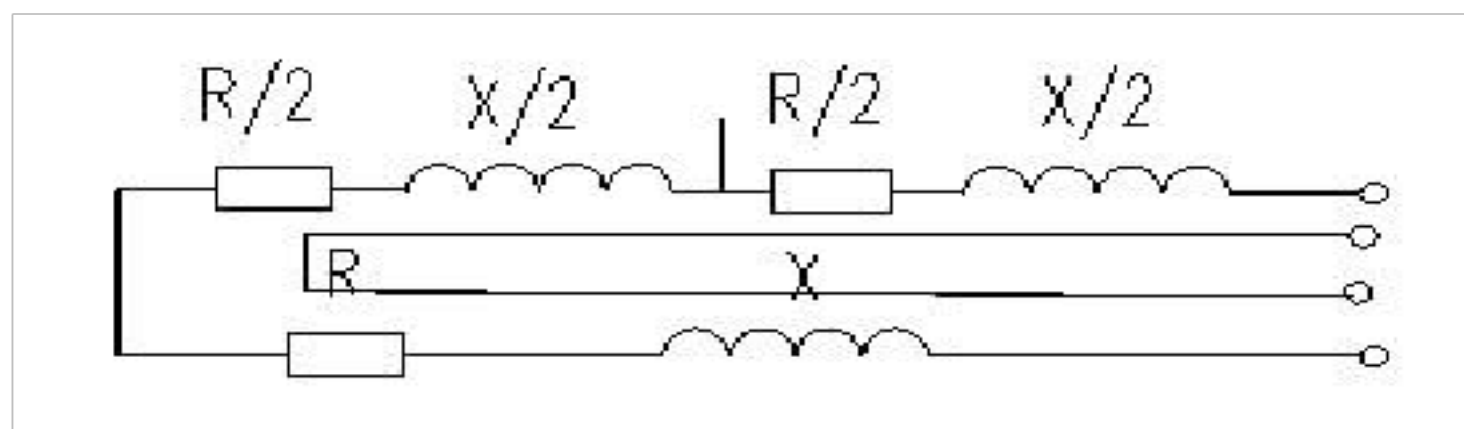


图 3-2. 等效电路

因此

已知:当该段线路布置为7台风机时线路损耗为

$$S_1 = 10.5MVA$$

$$\Delta S_{L1} = \left(\frac{S_1}{U_A}\right)^2 (R_L + jX_L) = \frac{10.5^2}{35^2} (0.552 + j0.42) = 0.050 + j0.039MVA$$

当该段线路布置为6台风机时线路损耗为

$$S_2 = 9MVA$$

$$\Delta S_{L2} = \left(\frac{S_2}{U_A}\right)^2 (R_L + jX_L) = \frac{9^2}{35^2} (0.552 + j0.42) = 0.036 + j0.028MVA$$

线路总损耗为:

$$\Delta S_L = \Delta S_{L1} * 3 + \Delta S_{L2} * 2 = 0.252 + j0.173MVA$$

线路末端的输出功率需为:

$$S_L = S_f - \Delta S_L = 49.248 - j0.173MVA$$

线路侧电压分布:

$$\Delta U_L = \frac{P_L R_L + Q_L X_L}{U_L} = \frac{10.5 * 0.552}{35} = 0.166KV$$

$$\therefore U_L = 34.834KV$$

变压器内的功率损耗为:

$$\Delta S_T = \Delta P_T + j\Delta Q_T = \left(\frac{S}{U_B}\right)^2 (R_T + jX_T)$$

$$= \frac{49.248^2 + 0.173^2}{110^2} (0.723 + j19.552) = 0.145 + j3.919MVA$$

由于变压器侧电纳影响:

$$\Delta P_{xT} = G_T U_2^2 = 0.041MVA$$

$$\Delta Q_{xT} = B_T U_2^2 = 0.078MVA$$

变压器的损耗为:

$$\Delta S'_T = 0.186 + j3.997MVA$$

总输出电量为:

$$\therefore S_T = S_L - \Delta S'_T = 49.062 - j4.17 \text{ MVA}$$

变压器电压分压降 (不计  $\sigma U_T$ ):

$$\Delta U_T = \frac{P''R + Q''X}{U_I} = \frac{49.062 * 0.723 + 4.17 * 19.552}{110} = 1.064 \text{KV}$$

所以, 变压器高压侧电压为:

$$U_L = 34.834 * \frac{U_{1N}}{U_{2N}} - \Delta U_T = 108.414 \text{KV}$$

通过计算得出:

表 3

	链式	单边环
有功损耗	0.590MVA	0.252MVA
无功损耗	0.451MVA	0.173MVA
电压偏差	0.442KV	0.166KV

### 3.3.2.2 经济比较

表 4

	链式	单边环
线路长度(km*30)	28*30	56*30
断路器(个*万元)	5*30	10*30
电流互感器(个*万元)	5*10	10*10
总价(万元)	1040	2080

可见, 单边环的线路长度为链式的两倍, 断路器和电流互感器也比链式各多出了五个, 投资成本较大. 大约多支出 1040 万元。

### 3.3.3 结论

- (1) 链形结构的建设成本低, 但是有功损耗、电压偏差较大;

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/438054060127006067>