

# 基于 eNSP 的高可靠性企业园区网设计与仿真

时 晨, 赵洪钢, 余瑞丰, 李国栋  
(国防科技大学 信息通信学院, 西安 710106)



**摘 要:** 高可靠性是企业园区网设计与建设过程中需要考虑的重要因素和技术难点。提出一种基于 eNSP 的高可靠性企业园区网设计方案,通过 eNSP 模拟企业园区网中的接入交换机、汇聚交换机等网络设备,并在网络设备上采用 VLAN 虚拟局域网、MSTP 多生成树协议、LACP 链路聚合和 VLAN 聚合等多种协议配置,使构建的网络不仅具有较高的通信可靠性,并且能够满足企业的多业务需求。详细的仿真结果及分析表明,该方案有效提升了企业园区网的通信可靠性和 IP 编址灵活性,并很好的满足了企业多业务需求,能够为实际网络的建设提供有效参考和依据。

**关键词:** 企业园区网; 高可靠性; eNSP; 交换机

中图分类号: TP 393.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7167(2020)02-0112-06

## Design and Simulation of High-Reliability Enterprise Park Network Based on eNSP

SHI Chen, ZHAO Honggang, YU Ruifeng, LI Guodong

(College of Information and Communication, National University of Defense Technology, Xi'an 710106, China)

**Abstract:** High reliability is an important factor and technical difficulty to be considered in the design and construction of enterprise park network. A high-reliability enterprise park network design scheme based on Huawei eNSP is proposed. In this scheme, network devices such as access switches and aggregation switches are simulated by eNSP, and multiple protocols are adopted in these network devices, such as VLAN, MSTP, LACP, VLAN aggregation and so on. Thus, the enterprise park network designed by this scheme can not only have high communication reliability, but also meet the multi-service requirements of the enterprise. The detailed simulation results and analysis show that the scheme effectively improves the communication reliability and IP addressing flexibility of the enterprise park network, and provides an effective reference and basis for the actual network construction.

**Key words:** enterprise park network; high-reliability; eNSP; switch

## 0 引 言

互联网的迅猛发展为企业提供了公平竞争平台和大量市场机会,带来了直接、间接和潜在的效益;建设一个可靠、健壮、稳定的企业园区网,对改善经营环境、

提高效率、开拓市场、宣传形象、提高效益至关重要。企业网络仿真平台(Enterprise Network Simulation Platform, eNSP)是一款免费、可扩展、图形化的网络设备仿真平台,主要对企业网络路由器、交换机、无线局域网等设备进行软件仿真,完美呈现真实设备部署实景,支持大型网络模拟<sup>[1]</sup>。使用该平台,可以灵活地在规划与设计阶段进行各种实验和性能测试,为网络的建设提供参考和依据。

在企业园区网设计与建设过程中,高可靠性是需要考虑的重要因素和技术难点<sup>[2]</sup>。本文首先介绍了

收稿日期: 2019-04-03

基金项目: 院级教学研究课题 JY18B042

作者简介: 时 晨(1986-),女,山东单县人,硕士,讲师,研究方向为信息网络技术。

Tel.: 029-84706236; E-mail: shishen26@163.com

虚拟局域网、链路聚合等企业园区网设计关键技术,提出了一种基于 eNSP 的高可靠性企业园区网设计方案。通过 eNSP 模拟企业园区网中的接入交换机、汇聚交换机等网络设备,并采用虚拟局域网(Virtual Local Area Network, VLAN)技术、多生成树协议(Multiple Instances Spanning Trees Protocol, MSTP)、链路聚合控制协议(Link Aggregation Control Protocol, LACP)和 VLAN 聚合等多种协议配置,使网络不仅具有较高的通信可靠性,并且能够满足多业务需求。仿真结果表明,该方案有效提升了企业园区网的可靠性和灵活性,能够为网络的建设提供有效的参考和依据。

## 1 企业园区网设计关键技术

### 1.1 VLAN 技术

在企业园区网中,主要的网络设备是交换机。交换机的所有端口都位于同一广播域中,一台主机发出的广播帧能够到达网络中的所有设备,有限的网络资源被大量广播信息占用,一旦由于某种原因,例如 ARP 攻击、端口故障、蠕虫病毒或人为操作不当等造成一台或多台设备产生过多的广播帧,可能会引发广播风暴<sup>[3]</sup>,影响整个网络的连通性。VLAN 技术是将一个物理局域网在逻辑上划分为多个虚拟局域网的以太网技术,减小了广播域的范围,抑制了广播帧对局域网内用户通信的影响<sup>[4]</sup>。VLAN 技术的优势主要有<sup>[5]</sup>:

(1) 有效控制广播域范围。广播帧仅在 VLAN 中传播,节省了带宽,提高了网络处理能力。

(2) 增强局域网的安全性。不同 VLAN 内的用户不能进行数据链路层通信,若要通信需借助网络层设备。

(3) 灵活构建虚拟工作组。VLAN 划分不受物理位置的限制,网络构建和维护方便灵活。

(4) 增强网络的可靠性。VLAN 划分可以将一些故障限制在一个 VLAN 内。

### 1.2 以太网链路聚合技术

根据企业业务需求的发展和变化,如需对网络进行升级和扩容,往往会对骨干链路的带宽和可靠性提出更高的要求。传统做法是进行硬件升级,费用昂贵,且不够灵活。采用链路聚合技术,可以仅通过配置,将多个同类型的物理以太网接口捆绑成一个逻辑接口,可以增加链路带宽、设置备份链路以提高关键链路的可靠性<sup>[6]</sup>。LACP<sup>[7]</sup>能够在链路发生故障时,将备份链路自动切换为活动链路,保证链路的总带宽和连通性不受故障影响,提高链路的可靠性。

### 1.3 MSTP 技术

通常在设计企业园区网时,为避免单点故障需要进行链路的冗余备份,容易引发广播风暴。生成树协

议<sup>[8]</sup>(Spanning Tree Protocol, STP)可以将有环网络修剪为无环的树形网络<sup>[9]</sup>,阻断冗余链路,避免广播风暴,并在链路发生故障时,自动启用冗余备份链路,保证网络的连通性,提高网络的可靠性<sup>[10]</sup>。MSTP<sup>[11]</sup>是 STP 的改进版:

(1) 较 STP 可提高网络收敛速度,缩短冗余链路启用后网络中断的时间;

(2) 计算多棵生成树,实现 VLAN 级别的负载分担,减少带宽浪费,降低链路发生拥塞的可能性;

(3) 具备 STP 基本功能,避免环路带来的广播风暴。

以上 3 个特性均能提高网络的可靠性。

### 1.4 VLAN 聚合技术

在企业园区网中,由于业务需求,不同 VLAN 的用户也需要通过 3 层交换机实现通信,这就需要给每个 VLAN 单独划分一个 IP 子网。这些 IP 子网的网络地址、子网定向广播地址、子网网关地址都无法分配给用户,造成 IP 地址浪费;若前期划分的 IP 子网地址不足,极不利于网络升级和扩容,给网络管理带来了一定的难度。VLAN 聚合技术通过配置 Super-VLAN,其中包含多个位于同一 IP 子网的 Sub-VLAN<sup>[12]</sup>,共用同一个网关 IP 地址,既能够实现 Sub-VLAN 之间的 2 层隔离,又能根据需求实现 Sub-VLAN 的 3 层通信<sup>[13]</sup>,避免不必要的 IP 地址浪费,降低网络管理的复杂性。

## 2 基于 eNSP 的高可靠性企业园区网设计

### 2.1 总体设计思路

本文使用 eNSP 1.2.00.510 网络设备仿真平台,设计了一种结构如图 1 所示的高可靠性企业园区网, S1/S2 是汇聚交换机(3 层交换机)、S3/S4 是接入交换机(2 层交换机)。

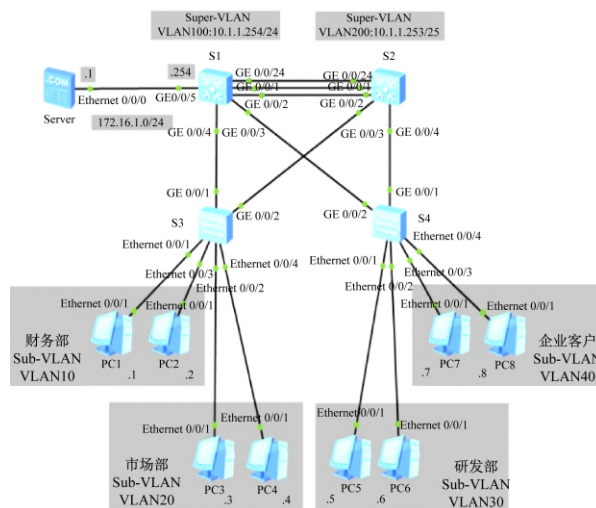


图 1 高可靠性企业园区网组网模型

某企业的业务需求有:

(1) 财务部、市场部和研发部的用户为企业员工,

均能访问企业服务器;

(2) 员工之间可以互通;

(3) 企业客户可以访问企业服务器,客户之间不能互通;

(4) 员工和客户之间不能互通。

总体思路是:

(1) 所有用户分为 4 个工作组,对应财务部、市场部、研发部和企业客户,为每个工作组划分 1 个 VLAN;

(2) 为提高关键链路的可靠性,在汇聚交换机之间配置 LACP,设置链路冗余备份;

(3) 为避免单点故障,在交换机之间设置冗余链路;

(4) 开启 MSTP,提高网络可靠性,针对不同 VLAN 实现负载分担;

(5) 配置 VLAN 聚合降低管理成本、节省 IP 地址。本局域网未设计外网连接。

## 2.2 详细网络规划

为了使交换机既能在 2 层隔离广播风暴又能在 3 层实现网络互通,在 S1/S2 上划分 2 个 Super-VLAN,分别是: VLAN100/200,以及 4 个 Sub-VLAN,分别是: VLAN10/20/30/40。VLAN100 聚合 VLAN10/20, VLAN200 聚合 VLAN30/40;所有 VLAN 均处于同一 IP 子网 10.1.1.0/24。

为实现冗余链路在关键链路发生故障时自动启用,在 S1/S2 之间配置 LACP 链路聚合。在所有交换机上开启 MSTP,创建两个实例,使得财务部和市场部数据流量优先使用 S3-S1-Server 路径,S3-S2-S1-Server 作为备份;研发部和企业客户的数据流量优先使用 S4-S2-S1-Server 路径,S4-S1-Server 作为备份,以减轻设备负载且不同路径互为备份。

配置 VLAN 间路由,使得用户之间可以互访,并且都可以访问企业服务器;S4 配置交换机端口 2 层隔离,使得企业客户之间不能互通,提供更安全、灵活的组网方案<sup>[14]</sup>;配置访问控制列表(Access Control Lists, ACL),使网络设备可以通过匹配规则过滤报文<sup>[15]</sup>,使得员工与客户之间不能互通。IP 地址规划见表 1。

## 3 基于 eNSP 的高可靠性企业园区网配置实现

### 3.1 S1 的配置实现

对 S1 进行 Super-VLAN、VLAN、LACP 和 MSTP 等多种协议配置,主要代码如下:

(1) Super-VLAN

```
[s1]vlan batch 10 20 30 40 100
```

#创建 vlan

```
[s1-vlan100]aggregate-vlan
```

#指定 vlan100 为 Super-VLAN

表 1 设备 IP 地址规划

设备	所属 VLAN	IP 地址
汇聚交换机 S1	VLAN 1	172.16.1.254/24
	VLAN 100	10.1.1.254/24
汇聚交换机 S2	VLAN 200	10.1.1.253/24
服务器 Server		172.16.1.1/24
财务部 PC1	VLAN 10	10.1.1.1/24
		10.1.1.2/24
市场部 PC3	VLAN 20	10.1.1.3/24
		10.1.1.4/24
研发部 PC5	VLAN 30	10.1.1.5/24
		10.1.1.6/24
公司客户 PC7	VLAN 40	10.1.1.7/24
		10.1.1.8/24

```
[s1-vlan100]access-vlan 10 20
```

#将 Sub-VLAN 加入 Super-VLAN

```
[s1-Vlanif100]arp-proxy enable
```

#使能 vlanif100 接口的 ARP 代理功能

```
[s1-Vlanif100]arp-proxy inter-sub-vlan-proxy enable
```

#使能 Sub-VLAN 间的 ARP 代理功能

(2) VLAN Trunk( G0/0/4 同 G0/0/3)

```
[s1-GigabitEthernet0/0/3]port link-type trunk
```

#将 G0/0/3 改为 trunk 模式

```
[s1-GigabitEthernet0/0/3]port trunk allow-pass vlan 10 20 30 40
```

#G0/0/3 允许 Sub-VLAN 通过

(3) VLAN 间路由

```
[s1-Vlanif100]ip address 10.1.1.254 24
```

#配置 vlanif100 的 IP 地址

```
[s1-Vlanif1]ip address 172.16.1.254 24
```

(4) LACP( G0/0/2 同 G0/0/1)

```
[s1]interface Eth-Trunk 1
```

#创建 Eth-Trunk1 接口

```
[s1-Eth-Trunk1]mode lacp-static
```

#配置链路聚合模式为 LACP

```
[s1-Eth-Trunk1]trunkport GigabitEthernet 0/0/1 0/0/2 0/0/3 24
```

#将接口加入 Eth-Trunk1

```
[s1-Eth-Trunk1]max active-linknumber 2
```

#配置活动接口上限阈值

```
[s1-Eth-Trunk1]least active-linknumber 1
```

#配置活动接口下限阈值

```
[s1-Eth-Trunk1]port link-type trunk
```

#将 Eth-Trunk1 改为 trunk 模式

```
[s1-Eth-Trunk1]port trunk allow-pass vlan 10 20 30 40
```

# Eth-Trunk1 允许 Sub-VLAN 通过

```
[s1]lacp priority 100
```

#配置 S1 成为 LACP 主动端

```
[s1-GigabitEthernet0/0/1]lacp priority 100
```



#配置接口优先级确定活动链路

(5) MSTP

```
[s1]stp region-configuration
```

#进入 MST 域视图

```
[s1-mst-region]region-name qiyewang
```

#配置 MST 域名

```
[s1-mst-region]instance 1 vlan 20 20
```

#配置实例 1 映射 VLAN10、VLAN20

```
[s1-mst-region]instance 2 vlan 30 40
```

#配置实例 2 映射 VLAN30、VLAN40

```
[s1-mst-region]active region-configuration
```

#激活 MST 域配置

```
[s1]stp instance 1 priority 0
```

#配置实例 1 中 S1 为根桥

```
[s1]stp instance 2 priority 4096
```

#配置实例 2 中 S1 为备份根桥

### 3.2 S2 的配置实现

S2 中 Super-VLAN 配置代码如下 (VLAN、LACP、MSTP 均同 S1) :

```
[s2-vlan200]aggregate-vlan
```

```
[s2-vlan200]access-vlan 30 40
```

```
[s2-Vlanif200]ip address 10.1.1.253 24
```

```
[s2-Vlanif200]arp-proxy enable
```

```
[s2-Vlanif200]arp-proxy inter-sub-vlan-proxy enable
```

### 3.3 S3 的配置实现

对 S3 进行 VLAN(省略)、MSTP 配置(同 S1)。

### 3.4 S4 的配置实现

对 S4 进行 VLAN、MSTP(均同 S3)、端口隔离和 ACL 等协议配置,主要代码如下:

(1) 端口隔离配置(E0/0/4 同 E0/0/3)

```
[s4]port-isolate mode l2
```

#配置端口隔离模式为二层隔离

```
[s4-Ethernet0/0/3]port-isolate enable
```

#使能端口隔离功能

(2) ACL 配置(E0/0/4 同 E0/0/3)

```
[s4]acl number 3000
```

```
[s4-acl-adv-3000]rule permit ip source 172.16.1.1 0.0.0.0
```

```
[s4-acl-adv-3000]rule deny ip source any
```

#配置只允许客户与 Server 通信的数据包通过

```
[s4-Ethernet0/0/4]traffic-filter outbound acl 3000
```

#在接口使能 acl 3000

## 4 仿真结果及分析

### 4.1 开启 MSTP 带来的高可靠性分析

Wireshark 是目前使用非常广泛的网络抓包分析软件之一<sup>[16]</sup>。通过 Wireshark 对 S3 的 G0/0/1 和 G0/0/2 接口抓包,图 2 左侧上半部分为 S3 的 G0/0/1 接口抓包结果,左侧下半部分为 S3 的 G0/0/2 接口抓包结果,右侧为 PC1 Ping Server 的结果,可以看出,

VLAN10 访问 Server 的数据是通过 S3 的 G0/0/1 接口转发至 S1,再经路由转发给 Server。

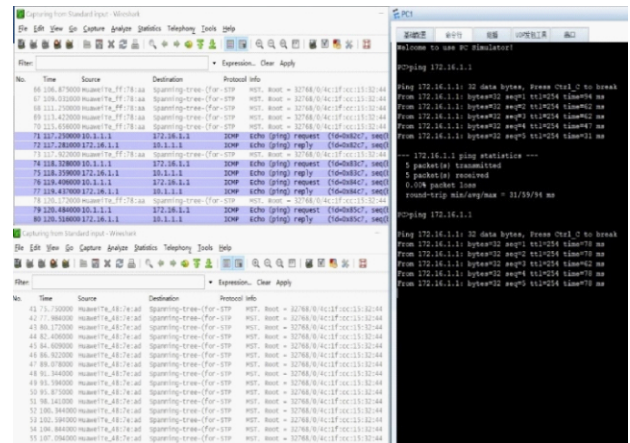


图2 链路正常时 VLAN10 数据转发路径

对 G0/0/1 接口进行 shutdown 操作,模拟该链路发生故障,如图 3 所示,发现 PC1 访问 Server 的数据流量中断了一段时间,这是由于 MSTP 重新计算生成树而导致的。待连通性恢复之后,数据通过 S3 的 G0/0/2 接口转发至 S2,进而转发至 S1,最后转发给 Server。VLAN30 的测试结果也符合企业业务要求,这里不再赘述。从仿真结果可以看出,MSTP 能够在对不同 VLAN 的实现负载分担、增加链路的总带宽、降低链路拥塞的可能性、存在冗余备份链路的情况下,有效避免 2 层环路带来的风险,提高园区网的可靠性,并且备份链路启用时无需人工操作,降低了管理成本。

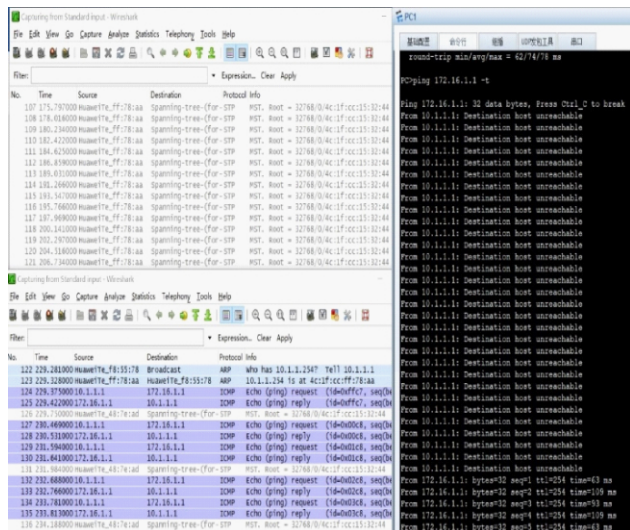


图3 备份链路启用后 VLAN10 数据转发路径

### 4.2 LACP 链路聚合带来的高可靠性分析

通过查看 LACP 接口成员信息,图 4 显示 S1 的 G0/0/1 和 G0/0/2 为活动接口,G0/0/24 为冗余备份接口,该链路的总带宽增大为配置 LACP 之前的 2 倍。对 S1 的 G0/0/2 进行 shutdown 操作,模拟该链路发生故障的情况,再次查看 eth-trunk 1 接口。

```

[~]display eth-trunk 1
Eth-Trunk1's state information is:
Local:
LAG ID: 1          WorkingMode: STATIC
Preempt Delay: Disabled  Hash arithmetic: According to SIP-XOR-DIP
System Priority: 0      System ID: 4c1f-c03b-3574
Least Active-linknumber: 1  Max Active-linknumber: 2
Operate status: up      Number Of Up Port In Trunk: 2
-----
ActorPortName      Status      PortType PortPri PortNo PortKey PortState Weight
GigabitEthernet0/0/1 Selected LGE 0 2 305 10111100 1
GigabitEthernet0/0/2 Selected LGE 0 3 305 10111100 1
GigabitEthernet0/0/24 Unselected LGE 32768 25 305 10100010 1

```

图 4 链路正常时的活动接口

图 5 显示 G0/0/24 接口状态变为活动接口。从仿真结果可见, LACP 链路聚合增大了链路总带宽, 实现了冗余链路在关键链路发生故障时自动启用, 无需人工操作, 降低了管理成本, 并且保证了关键链路的连通性和总带宽不受故障影响, 提高了网络的可靠性。

```

[~]display eth-trunk 1
Eth-Trunk1's state information is:
Local:
LAG ID: 1          WorkingMode: STATIC
Preempt Delay: Disabled  Hash arithmetic: According to SIP-XOR-DIP
System Priority: 0      System ID: 4c1f-c03b-3574
Least Active-linknumber: 1  Max Active-linknumber: 2
Operate status: up      Number Of Up Port In Trunk: 2
-----
ActorPortName      Status      PortType PortPri PortNo PortKey PortState Weight
GigabitEthernet0/0/1 Selected LGE 0 2 305 10111100 1
GigabitEthernet0/0/2 Selected LGE 0 3 305 10100010 1
GigabitEthernet0/0/24 Selected LGE 32768 25 305 10111100 1

```

图 5 链路故障后的活动接口

Figure 6 shows multiple PC terminal windows (PC1, PC2, PC3, PC4) displaying successful ping results to the server (172.16.1.1). The output for each PC shows 5 packets transmitted and received with 0.00% packet loss. Red text overlays indicate 'VLAN10 ping 172.16.1.1' and 'VLAN10 ping 172.16.1.1'.

图 6 员工均能访问企业服务器

Figure 7 shows multiple PC terminal windows (PC1, PC2, PC3, PC4) displaying successful ping results between employees (VLAN10). The output for each PC shows 5 packets transmitted and received with 0.00% packet loss. Red text overlays indicate 'VLAN10 ping 172.16.1.1' and 'VLAN10 ping 172.16.1.1'.

图 7 员工之间可以互通

Figure 8 shows PC7 terminal window displaying successful ping results to the server (172.16.1.1) but failed ping results between clients (10.1.1.1, 10.1.1.3, 10.1.1.5). Red text overlays indicate '客户可以访问Server' and '客户之间不能相互访问'.

图 8 客户可访问企业服务器但客户之间不能互通

Figure 9 shows PC7 terminal window displaying failed ping results between employees (VLAN10) and clients (10.1.1.1, 10.1.1.3, 10.1.1.5). Red text overlays indicate 'VLAN10 ping 172.16.1.1' and '客户与员工不能相互通信'.

图 9 员工和客户之间不能互通

## 5 结 语

本文根据某企业的实际业务需求, 提出了一种基于 eNSP 的高可靠性企业园区网设计方案, 通过 eNSP

## 4.3 VLAN 聚合带来的 IP 地址灵活性分析

在本园区网中, 采用了 VLAN 聚合技术, 通过创建 Super-VLAN 给其 VLANIF 接口配置 IP 地址, 再创建多个 Sub-VLAN 作为 Super-VLAN 的成员, Sub-VLAN 都使用 Super-VLAN 的 VLANIF 接口 IP 地址作为网关。这样, Sub-VLAN 之间仍然 2 层隔离以抑制广播风暴, 并且可以通过 Super-VLAN 的网关地址实现 3 层互通。只要该 IP 子网的地址空间足够, 新进用户只需根据实际所处工作组加入相应的 Sub-VLAN 即可; 如果需要成立新的工作组, 也只需创建新的 Sub-VLAN 成员加入 Super-VLAN 即可。VLAN 聚合能够简化 IP 子网划分、降低管理成本、节省 IP 地址, 使得 VLAN 划分更加灵活。

## 4.4 业务需求完成情况分析

该企业园区网的业务需求完成情况如图 6~9 所示。从仿真结果可以看出, 本设计实现了该企业园区网的业务需求。

模拟企业园区网中的接入交换机、汇聚交换机等网络设备, 并采用 VLAN、LACP 链路聚合、多生成树协议 MSTP 和 VLAN 聚合等多种协议配置, 使构建的网络不仅具有较高的通信可靠性, 而且能够满足网络的多



业务需求。仿真结果表明,该方案有效提升了企业园区网的可靠性和灵活性,能够为实际网络的建设提供了有效的参考和依据。

#### 参考文献(References):

- [1] 孟祥成. 基于 eNSP 的防火墙仿真实验[J]. 实验室研究与探索, 2016, 35(4): 95-100.
- [2] 段国云,周迪民. 以太网网技术在校园网可靠性设计中的应用[J]. 计算机系统应用, 2011, 20(1): 146-149.
- [3] 褚连春. TCP/IP 网络广播风暴控制技术[J]. 计算机系统应用, 2000(12): 31-33.
- [4] 王 达. 华为交换机学习指南[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013.
- [5] 杭州华三通信技术有限公司. 路由交换技术第1卷(下册)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [6] 廉佐政,王海珍. 大型局域网中 VLAN 间可靠通信的仿真设计[J]. 计算机仿真, 2015, 32(7): 296-302.
- [7] 郑 涛,郭裕顺. 基于 LACP 协议的链路聚合状态机模块的实现[J]. 计算机系统应用, 2010, 19(5): 104-108.
- [8] 郭彦伟,郝建德. 生成树协议与交换网络环路研究[J]. 厦门大

- 学学报(自然科学版), 2006, 45(S1): 301-304.
- [9] Hojjat H., Nakhost H., Sirjani M. Formal verification of the IEEE 802.1D spanning tree protocol using extended reba[J]. Electronic Notes in Theoretical Computer Science, 2006, 159(4): 139-154.
- [10] 王 丽. 生成树协议与交换网络环路的研究[J]. 数字技术与应用, 2016(2): 87-88.
- [11] 谭志勇,李进生. 基于 MSTP + VRRP 的高可靠性园区网络设计与实现[J]. 计算机时代, 2018(2): 35-39, 42.
- [12] 陈 嵩,张 龙. 基于多运营商出口的高校校园网运维模型设计与实现[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2017, 33(4): 15-20.
- [13] 程传庆,黄求根,王 莉. VLAN 聚合技术研究和实现[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2005, 29(1): 141-146.
- [14] 林初建,张四海,王海英,等. 基于非对称 VLAN 的端口隔离技术研究与应用[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2015(S1): 232-239.
- [15] 李 勇,杨华芬. 访问控制列表在模拟器中的实验仿真与分析[J]. 实验室研究与探索, 2018, 37(12): 137-145.
- [16] 华为技术有限公司. HCNP 路由交换实验指南[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014.

(上接第 54 页)

#### 4 结 语

通过在感应电能传输系统的发射侧和接收侧分别施加补偿电路,提高 ICPT 系统的传输功率和效率,建立了以 DSP28335 为核心的 LCL 谐振型感应电能传输系统的实验样机。首先,对 LCL 谐振型感应电能传输系统的发射线圈恒流特性进行了实验研究,分别在不同负载、不同传输距离条件下进行实验。实验结果表明,系统发射线圈电流基本恒定;然后,对本文所提出的互感参数优化指标的可靠性进行了实验验证,实验结果显示了理论分析的正确性;最后,对所建立的 LCL 谐振型感应电能传输系统实验样机的传输功率和传输效率与传输距离的关系进行了实验研究,在实验平台上进行实验并得出以下结论:

(1) ICPT 系统发射线圈电流在变负载和变传输距离的影响下几乎保持恒定,有利于系统的稳定、可靠运行。

(2) 优化互感值选取适当的互感值可以达到电流增益与传输效率的优化匹配,从而使 ICPT 系统运行于期望状态。

#### 参考文献(References):

- [1] 赵争鸣,张艺明,陈凯楠. 磁耦合谐振式无线电能传输技术新进展[J]. 中国电机工程学报, 2013(3): 1-13.
- [2] Germano P, Chavanne J, Perriard Y. Inductive supply for a highly insulated device [C] // 2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). [s. l.]: [s. n.], 2015: 756-761.

- [3] Kushwaha B K, Rituraj G, Kumar P. Modeling and analysis of inductively coupled power transfer system [C] // 2015 IEEE International in Transportation Electrification Conference (ITEC). [s. l.]: [s. n.], 2015: 27-29.
- [4] 黄学良,谭林林,陈 中,等. 无线电能传输技术研究与应用综述[J]. 电工技术学报, 2013(10): 1-11.
- [5] 范兴明,莫小勇,张 鑫. 无线电能传输技术的研究现状与应用[J]. 中国电机工程学报, 2015(10): 2584-2600.
- [6] 张 波,疏许健,黄润鸿. 感应和谐振无线电能传输技术的发展[J]. 电工技术学报, 2017, 32(18): 3-17.
- [7] 孙 跃,陈 宇,唐春森,等. 感应电能传输系统输出电压调压电路研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(S1): 226-230.
- [8] Li Y L, Sun Yue, Dai Xin.  $\mu$  synthesis for frequency uncertainty of the ICPT System [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(1): 291-300.
- [9] 李素环,廖承林,王丽芳,等. 无线电能传输中线圈设计对效率的影响综述[J]. 电工技术学报, 2015(S1): 270-275.
- [10] 王 维,黄学良,谭林林,等. 磁谐振式无线电能传输系统谐振器参数对传输性能的影响性分析[J]. 电工技术学报, 2015(19): 1-6.
- [11] 苏玉刚,谢诗云,呼爱国,等. LCL 复合谐振型电场耦合式无线电能传输系统传输特性分析[J]. 电工技术学报, 2015(19): 55-60.
- [12] 戴 欣,余 奎,孙 跃. CLC 谐振型感应电能传输系统的  $H_{\infty}$  控制[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(3): 47-54.
- [13] 周继昆,张 荣,张 毅. LCL 谐振型感应电能传输系统特性[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016, 14(4): 615-620.
- [14] 狄东照,顾华利,韩 璐,等. 小功率磁耦合谐振式无线电能传输的研究[J]. 电力科学与工程, 2016, 32(9): 1-5.
- [15] Sibue J R, Kwimang G, Ferrieux J P, et al. A Global study of a contactless energy transfer system: Analytical design, virtual prototyping, and experimental validation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(10): 4690-4699.