

Reactive Power Optimization Study on Transmission System in Cape Town, South Africa

Fengzhen Ma

School of Mechanical Electronic & Information Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing
Email: mfengzhen0509@163.com

Received: Aug. 15th, 2015; accepted: Sep. 5th, 2015; published: Sep. 8th, 2015

Copyright © 2015 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

This paper conducts a study with the view of optimizing the reactive power flow on 400 kV and 765 kV Transmission Lines in the Cape Regions, South Africa. The power flowing on the system has a significant reactive component due to the long transmission distances. The appropriate flow of reactive power and the management of VAR sources are essential in the overall performance of this part of the system since it impacts directly on the available levels of supply capacity. The report will provide specific recommendations on optimal SVC voltage set-points and droop settings, tap-changer reference values and shunt device switching philosophy. As a starting point, the reactive power flow in the year 2006 was examined to establish a “base case” against which “future year” cases could be referenced. Two future dates were considered in the analysis: 2009 and 2012. Results show the reason why a VAR originates in a network and how to deal with these problems. The flow of steady-state reactive power on the system was analysed in 2009 and 2012.

Keywords

Transmission System, Reactive Power Optimization, SVC, Steady-State Study

南非Cape Town输电网络无功功率优化研究

马凤珍

中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京
Email: mfengzhen0509@163.com

收稿日期: 2015年8月15日; 录用日期: 2015年9月5日; 发布日期: 2015年9月8日

文章引用: 马凤珍. 南非 Cape Town 输电网络无功功率优化研究[J]. 输配电工程与技术, 2015, 4(3): 36-57.
<http://dx.doi.org/10.12677/tDET.2015.43005>

摘要

本文对南非Cape Town的400 kv和765 kv的输电网络的无功功率优化进行了可行性研究。由于输电距离长，这个系统中存在着不可忽视的无功功率。适当的无功潮流和无功电源的整体性能管理是电力传输系统的一个组成部分，因为它直接影响到系统的输送容量。本文将为此输电网络提供最佳的SVC电压的具体建议设置点和下垂设置、分接开关的参考值和分压器开关原理。采用的研究方法是将2006年作为案例分析的一个起点，对本系统的无功功率进行了分析，建立一个基准，以便对未来几年电网的无功功率进行对比分析。两个用来分析比对的算例是2009年和2012年该系统的无功功率流动情况。研究的结果解释了此系统无功功率产生的原因和怎样优化无功功率，并根据基准对2009年和2012年系统的稳态状况进行了分析。

关键词

输电网络，无功功率优化，静止型动态无功补偿，稳态分析

1. 介绍

Trans-Africa Projects (TAP)公司联合了 Power System Dynamics (PSD)，对提供给 Cape Regions 的 400 kv 和 765 kv 输电网络中的无功功率进行调查。通过 Mpumalanga 省东北部 400 kv 网络(主要是串联补偿)和 765 kv 输电线路，Cape Regions 的负荷中心地区连接到集中发电机的距离大约是 1500 公里。本研究的重点是调查 Koeberg/Muldersvlei 变电站之间的部分系统(南)及 Alpha/Zeus 变电站(北)。这个系统将被称为 Cape Transmission System，按 Eskom 公司的规划方式，它以跨越西部，东北部和南部(中央部分)网络(参见图 1) 为主。由于 Cape Transmission System 的长距离传输，在忽略其他条件的影响下，仅考虑这个网络的无功因素。因此，适当的无功潮流和无功电源的整体性能管理是 Eskom 公司电力传输系统的一部分，因为它直接影响到可用的供应能力。Eskom 目前专注于扩大 Cape Transmission System 输电能力。最重要的组成部分是扩展计划，扩展现有 765 kv 系统到 Cape Town (765 kv 系统目前终止于 Hydra 变电站)。计划将于 2012 年完成 765 kv 系统的扩展。本文以这一案例研究如何优化无功功率流动。

由于 Cape Transmission Network 传输距离很长，它有明显的无功功率。通过对并联无功补偿网络有效的控制，可增加兆瓦级电力传输容量，增加的传输容量主要因为 I^2R 损耗的减少[1]。此外，这也会减少电压骤降情况的概率，因为增加了电压的稳定裕度。特别是，可以通过并联电容器注入适当的无功功率，适当的调整电压控制设定点和 SVC 的斜坡，以及选择 765/400 kv 变压器正确的分接开关位置来优化无功功率。

本文调查的目的是最大限度的减少不适当的流动来优化 Cape Transmission Network 的无功功率流，只要功率传输能力和可靠性在技术上有可行性。此外，这项研究的一个重要成果是研究 Eskom 公司如何达到预期的优化目标。特别的，本文将提供最佳的 SVC 电压的具体建议设置点和下垂设置、分接开关的参考值和分压器开关原理。

采用的研究方法是将 2006 年作为案例分析的一个起点，对本系统的无功功率进行了分析，建立一个基准，以便对未来几年电网的无功功率进行对比分析。两个用来分析比对的算例是 2009 年和 2012 年该系统的无功功率流动情况。

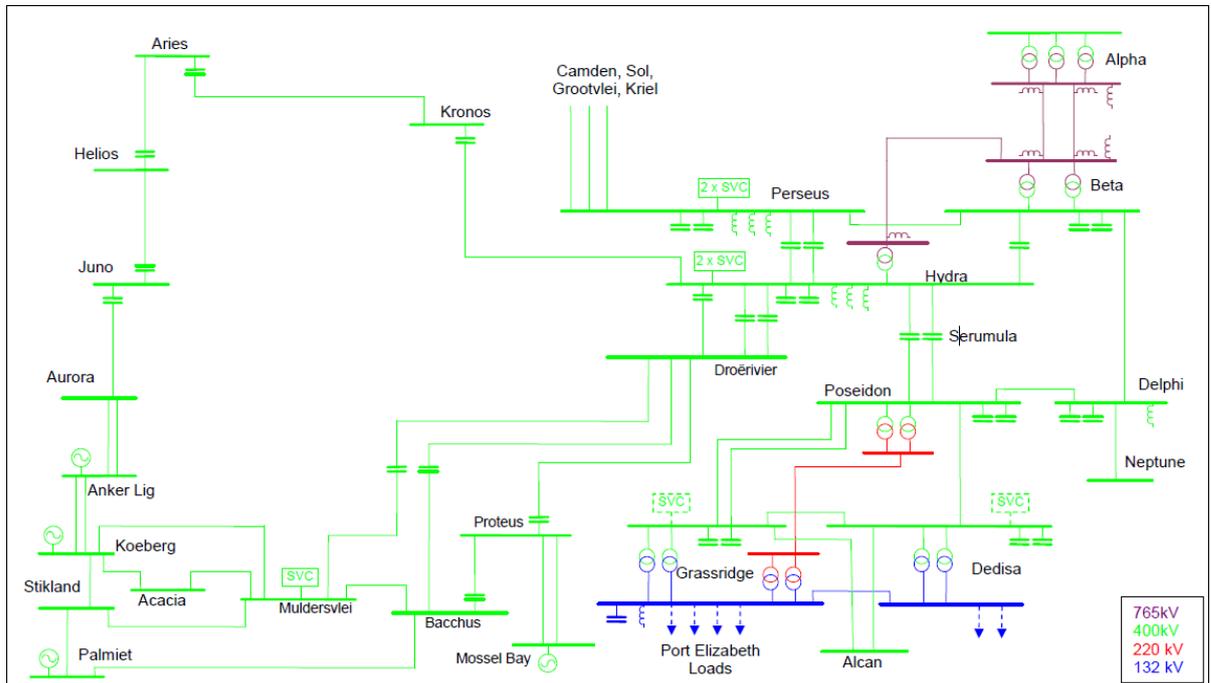


Figure 1. 2009 Network

图 1. 2009 年网络

注:

1) Eskom 公司目前正在升级 Perseus, Hydra 和 Poseidon 三处 AEG 的 SVC 控制系统。新的控制系统将在 2008 年底实现。在这个报告结果中考虑到的设定点和外部设备交换理念, 将在新的 SVC 控制器中实施。

2) Cape 的 765 kv 网络的扩展, 其中包括 Zeus, Mercury, Perseus, Gamma, Kapa 和 Omega 变电站, 计划在 2012 年完成, 这些扩展已被列入 2012 年案例中。这个报告也因此解决了 2012 年实现 765 kv 无功功率传输网络扩展的问题。

2. 无功功率流动系统描述

Cape Transmission System 中的 400 kv 线路主要是串联补偿电容提高传输能力。765 kv 系统, 连接 Alpha 和 Hydra 变电站, 距离约 720 公里, 覆盖部分 400 kv 系统。到 2012 年, 765 kv 输电网将扩展到 Cape Town 全市, 那时它将完全覆盖现有 400 kv 系统。

Cape Transmission System 可以被分为主干传输网络, 连接 Koeberg/Muldersvlei 变电站到 Perseus/Beta 变电站(见图 1)。本主干网络基本上处于一个单一的电力走廊。主干网络在 Perseus/Beta 变电站的北部分为 400 kv 和 765 kv 的电力走廊。The Greater Eastern Cape Region 由三条线路供电, 一条是从主干网络分出的 400 kv 线路, 一个双线从 Hydra 变电站分出的 400 kv 线路, 一个从 Beta 变电站分出的 400 kv 线路(一个最近建成的项目)。The Greater Eastern Cape Region 的两个主要负荷中心是 Port Elizabeth 和 East London。设想的将要建在 Port Elizabeth 的 Coega 工业负荷, 也将由三线 400 kv 系统供电。Hydra 变电站有一分叉点, 使连接 Hydra 变电站和 Muldersvlei 变电站的骨干 400 kv 系统向南运营, 连接 Hydra 变电站和 Koeberg 发电站的北部 400 kv 环网, 通过 Aries 变电站向北运行。所有 Perseus 和 Beta 以南的 400 kv 输电线路都是串联补偿。总共有 6 个大型 SVC 系统安装在 Cape Transmission System 中。其中的 5 个 SVC 位于 Hydra, Perseus 和 Poseidon 变电站的中间, 每个都有 -250/250 兆乏的调节能力。第五个 SVC, 负载补偿 SVC 的

范围-150/200兆乏,位于 Muldersvlei 变电站,接近 Western Cape 省负载中心。400 kv 网络提高传输能力,进行电压调节都需要这些 SVC。

出于对 2009 年和 2010 年运行状况的考虑,为分析数据做如下准备:

1) 2009 年的调查文件模拟现有 Cape Transmission Network 对 400kv 网络一些微小的改动。有问题的示意图网络如图 1 所示。

2) 2012 年的调查文件模拟了 2009 年的网络条件,添加第一个 765 kv 线路到 Cape Town。在系统规划中拟议了 765 kv 的解决方案。Coega 工业负荷和 SVC 有关项目还包括 2012 年的研究文件。图 2 显示了 2012 年 Cape Transmission Network 的示意图,和 765 kv 扩建计划项目。

注:

以下修正了来自 Escom 公司 2012 年的案例文件:

1) 总线 6024 年和 2900 年通过零阻抗线连接到一块,并且他们都连接有可投切电容器组。为了避免电压控制冲突的问题,将他们连到一个总线上,并在两个控制总线间连一个零阻抗线;

2) 发电机将控制发电机变压器高压侧母线电压。这扰乱了网络中的无功功率。控制模式发生了很大变化,所有的发电机控制发电机变压器低压侧母线电压;

3) Hydra 和 Perseus 的 SVC 作为发电机(TCR 部分的蓝本),并将可投切电容器组与下垂式变压器的低压侧相连(见 3.5 节)。在“下垂”变压器背后,SVC 模型通过适当的 MVA_r 限制变成一个无功电源。

4) 765/400 kV 变压器都是固定比例抽头。

在 2006 年 6 月 2006 年 12 月负荷试验被用作最大值和最低基数的情况下。

3. 研究方法、技术标准及处理假设

3.1. 无功功率(VAr)流动问题

网络中无功不匹配这种情况的产生主要是由于以下两种机制: 1) 传输线路的并联阻抗和负载,这主

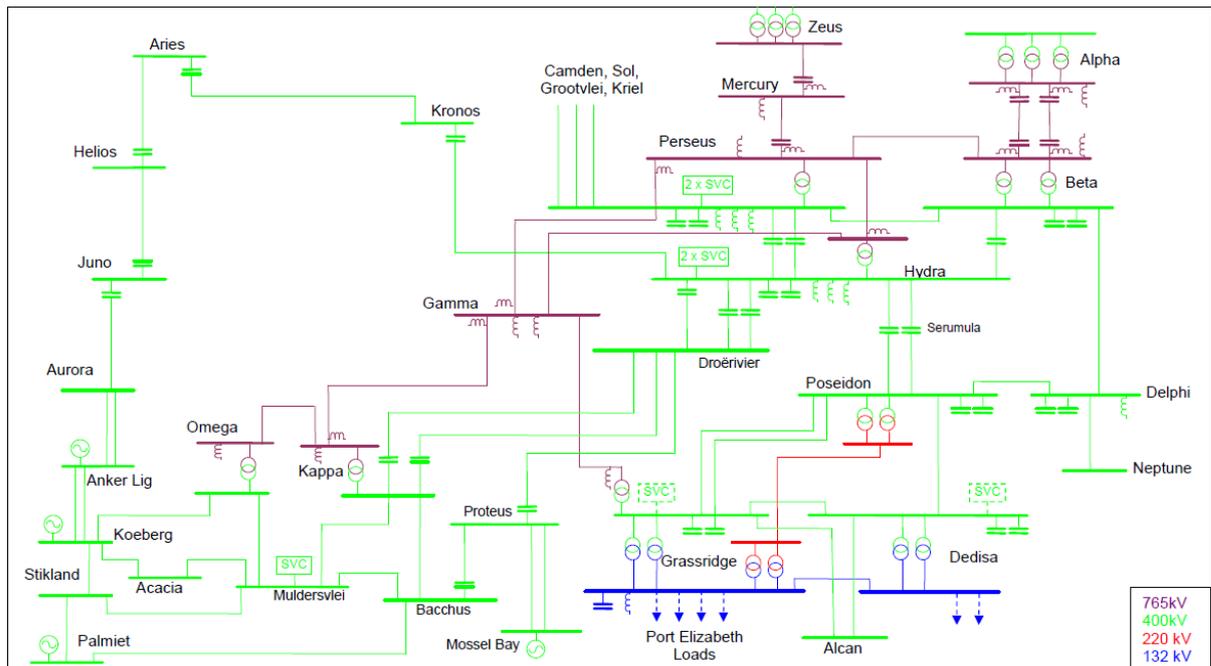


Figure 2. 2012 Network

图 2. 2012 年网络

要是涉及到系统电压分布[2]。2) 传输线路的串联阻抗和变压器，这涉及到网络中功率流。在这两种情况下，无功功率的失配应该放在局部解决。应该独立地应用于不同的电压水平。如果无功功率传输是通过电力网络或从一个电压等级到另一个等级，它增加了功率损失和增加了关键部件不必要的负载；也会增加网络电压发生不稳定扰动事件的可能性。

3.2. 基本解决方案

系统上使用的无功补偿设备大部分都是固定设备。这意味着可以使用并联和串联设备，补偿线路和负荷的无功功率，从而在数值和运行单元上控制电力网络的电压分布；线路电抗器应用于线路补偿(主要是为了限制开关过电压)，而不是为了电压调节。同样的道理也适用于母线电抗器，在正常工作条件下，应该用于电压调节的目的，而不是线路补偿。此外，当无功功率在网络中不同点间流动(同一电压等级或不同电压等级)，网络电压不容易稳定；例如，突然失去变压器时，高电压系统会向低电压系统注入大量的无功功率，导致系统电压不稳定。保护方案应该是，当线跳闸时，尽可能的使补偿装置同时从系统断开，以适应改变的潮流要求。

网络不同部分的无功功率的管理，理想情况下，应该考虑特定部分的典型需求，使能在本地得到解决。稳态无功可以用静态分流设备解决，而动态无功应由像 SVC，AVRs 等动态设备来解决。

通过 765/400 kV 耦合变压器施限制无功功率；无功功率的量应该低于 400 MVar。让 400 kvSVC 的参考电压跟随 765 kv 电压是一个可行的解决方案。

3.3. 系统操作

Cape Transmission System 的操作是基于考虑发生在 Hydra 变电站南北的情况。Hydra 变电站是 Cape Transmission System 中的一个关键节点，因为通向西部、南部和 Namaqualand 地区的所有线路都连接到这个变电站；因此，所有流入这些地区的电力必须通过这一个变电站。Hydra Substation 也是一个向 the Greater Eastern Cape Region 供电的关键连接点。当在 Koeberg 的其他发电厂被迫中断时，Cape Transmission System 将在为消费者提供电力中发挥重要作用。

表 1 显示了每个研究案例数据来源。

3.4. SVC 模型

作为包含在 Eskom 公司 PSS/E 案例文件的 Hydra 和 Perseus 的 SVC 模型，它会影响外部连接设备的开关。如下(图 3)所示，Eskom 模型采用变压器来代表 SVC 的下垂。该并联电容器被清楚的建模且并联到发电机上(TCR 部分)，来模拟在 SVC 的整个范围内，电容器组上二次电压变化的影响。以这种方式对 SVC 建模的问题是 SVC2%的下垂。实际的降压变压器通常是 12%，这种方式则少得多。因此，并联电容器上电压的影响没有完全考虑进 SVC 的设计中，由并联电容器组上电压的影响而造成的任何情况，制造商都要考虑到，以确保设计参数满足高压母线的要求。

图 4 和图 5 显示了 SVC 的初级和次级电压 0%和 5%的下垂。它还表明 SVC 的输出会根据不同的内部设备而切换。很明显，二次电压的变化不是由下垂决定的，而是由 SVC 降压变压器的阻抗[3]。因此提出了模拟 SVC，把它作为在仅有的变压器后的一个无功发生器，变压器阻抗代表了 SVC 下垂。发电机由于 SVC 的作用可以有兆乏的变化范围，SVC 中的分流开关将被正确地模拟。

在实际中，TCR 的输出决定外部设备的开关点。在 PSSE 中不易实现。然而在这个案例中对于 SVC 中的下垂，外部设备的开关可以配合高压母线的电压变化。例如，从图 5 中，可以看到，如果外部设备的设定点设定在 0.99 pu 和 1.01 pu 的输出电压，SVC 的输出会有 ± 0.2 的波动。

Table 1. Generation pattern
表 1. 产生案例

	Koeberg Ankerlig Palmiet Mosselbay	Tutuka Grootvlei Kriel Camden
2009 年轻载情况	1	3
	0	3
	1	3
	0	3
2009 年高负载情况	2	6
	2	6
	2	6
	2	6
2012 年轻载情况	1	3
	0	3
	1	3
	0	3
2012 年轻载情况	2	6
	2	6
	2	6
	2	6

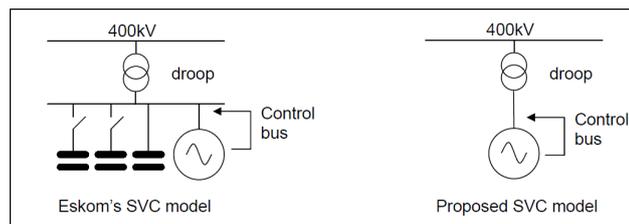


Figure 3. SVC model

图 3. SVC 模型

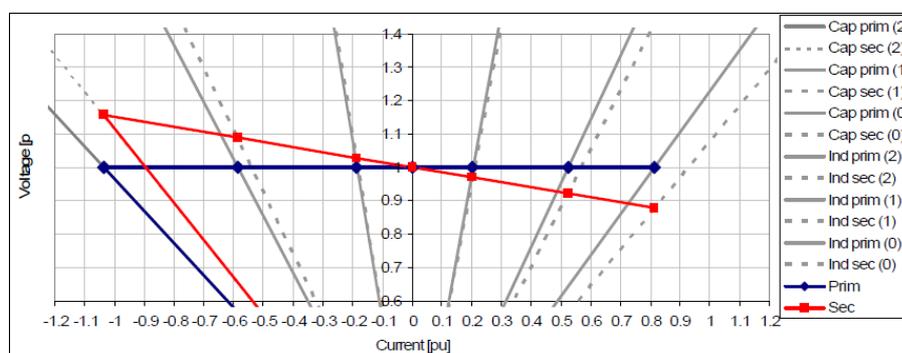


Figure 4. SVC VI-characteristic with 0% droop

图 4. SVC 0%下垂时的 VI 特性曲线

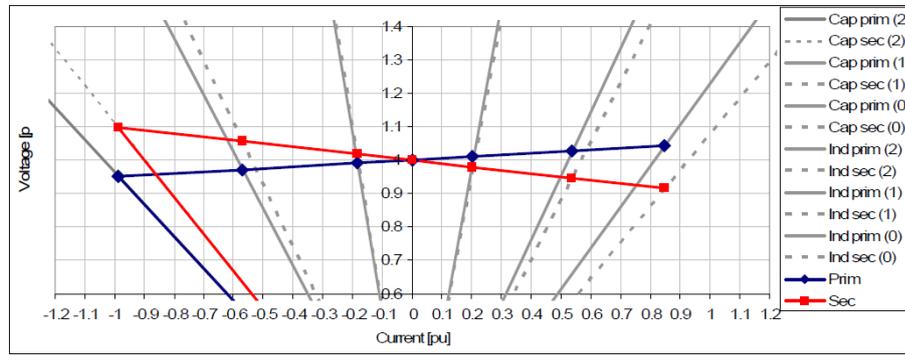


Figure 5. SVC VI-characteristic with 5% droop

图 5. SVC 5%下垂时的 VI 特性曲线

4. 稳态研究

首先分析 the Cape Transmission System 上稳态无功功率。这种分析指出最敏感地区网络中的无功功率流动。本节一开始就说明了对网络无功功率的测试结果是 2006 年的。接着是对 2009 年无功功率的预测分析。正常负载量的增加和新发电厂的加入等重要的因素都考虑到了。最后，调查加入了 2012 年电网状况的分析。2012 年的网络包括前面提到的 765kV 扩张计划(第一个 765 kV 到 Cape Town)和 Coega 工业负荷的规划。

4.1. 无功功率流

这个分析显示出了，2006 年仅 Koeberg 发电机工作，高负载情况下电网中无功功率的流动。此分析的结果为网络的功率流提供了一个基准参考，并对 2009 和 2012 案例分析提供了方向。

4.1.1. 高负载条件下

图 6 显示了 2006 年，最大无功功率流在高负载情况下的各种单一故障停电，并将其列于表 2。无功功率的最大值记录在线路或者变压器的一侧。

1) 结果根据线路各自的颜色来分组。这些线路包括 765 kV 行，Hydra 以北 400 kV 的线路，Cape 东部 400 kV 线路，400 kV 线路在北开普，400 kV 线路在开普敦南部在开普敦地区 400 kV 线路。765/400 kV 变压器，400 千伏 SVC 也组合在一起。

2) 图 6 显示了一个无功功率限制，记为“Q 限制”(橙色)。这极限值的选择与特定电压水平下一个可调并联设备的大小相匹配。765 kV 和 400 kV 设备的无功功率分别为 400 MVar 和 100 MVar。此数值远高于敏感地区显示的限制值。

3) 最大无功功率系统正常运行使用“Healthy Max Q”(红色)表示。

4) 所有突发事件的平均无功功率是“AllAverage Q”(绿色)。

5) 所有突发事件的最大无功功率是“AllMax Q”(蓝色)。

6) 排除北环突发事件的最大无功功率流动，用“Excl north ring Max Q”(黑色)。

Beta-Perseus 400 kV 线路总是有很高的无功功率流。这导致 765 kV 线路产生的无功功率，流入了 400 kV 线路的电抗器和 Perseus 的 SVC 中。这已经被 Beta 的 765/400 kV 变压器和 Perseus 的 400 kV 线路上的 SVC 证实了。当 Beta-Hydra 765 kV 线路退出电网后，Beta-Hydra 和 Perseus-Hydra 400 kV 线路的无功功率会增加。该图的最大价值在于，排除在北环无功功率远低于 Hydra 南部线路的最大值这一偶然事件。由此可见，网络最为敏感的是北环上的突发事件。

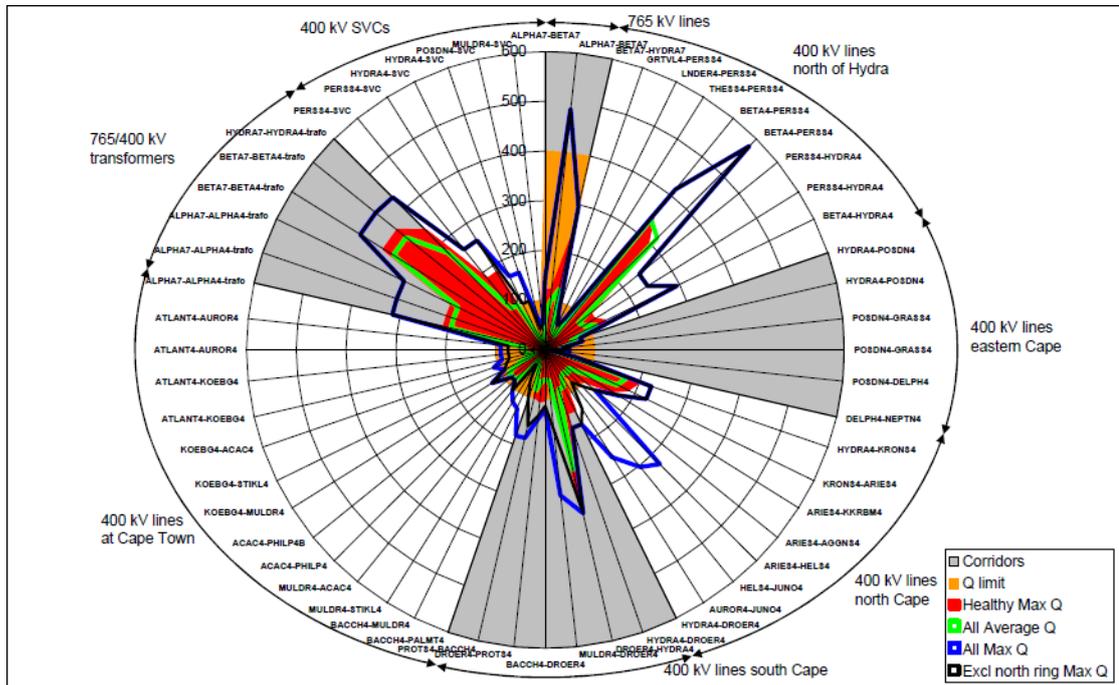


Figure 6. The maximum reactive power flows under 2006 high load

图 6. 2006 年高负载情况下的最大无功功率

Table 2. List of contingencies and associated losses for 2006 high load case

表 2. 2006 年高负载情况下的突发事件和相关的损失清单

Contingency	Difference in losses from System Healthy [MW]	Difference in losses based on System Healthy [MW]
System Health		
Alpha-Beta 765	94	8%
Perseus-Hydra 765	129	10%
Beta-Perseus 400	3	0%
Beta-Hydra 400	20	2%
Perseus-Grootvlei 400	15	1%
Perseus-Hydra 400	18	1%
Hydra-Droërvier 400-3	24	2%
Droërvier-Proteus 400	38	3%
Droërvier-Bacchus 400	32	3%
Droërvier-Muldersvlei 400	71	6%
Muldersvlei-Bacchus 400	55	4%
Muldersvlei-Acacia 400	5	0%
Acacia-Koeberg 400	8	1%
Acacia-Juno 400	20	2%
Hydra-Kronos 400	147	12%

图 7 显示了线路、变压器和 SVC 各自的最大和最小无功功率。正值表示无功功率是流入线、变压器

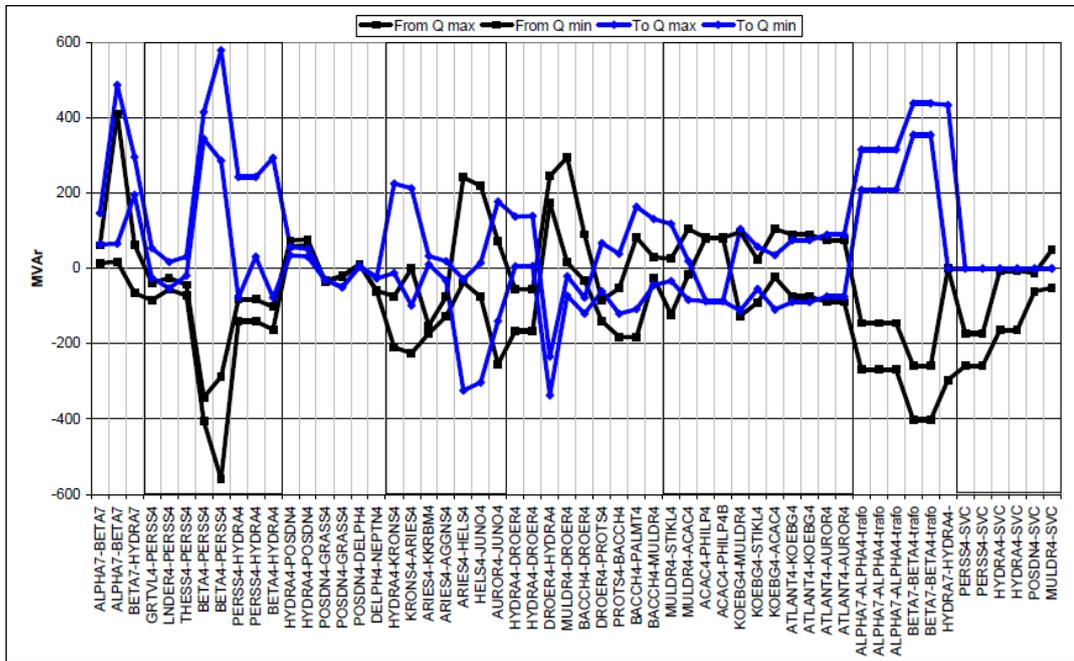


Figure 7. The maximum and minimum reactive power flows of 2006 high load
图 7. 2006 年高负载情况下的最大和最小无功功率

或 SVC 的。第一个变电站描述的名称，是“从”总线(黑色曲线)，第二个变电站是“到”总线(蓝色曲线)。只要黑色和蓝色的曲线有不同的信号，就表明有无功率流过，例如 Beta-Perseus 400 kv 线路。如果黑色和蓝色曲线有相同的标志和一个较大的幅度，它表明线路有无功率生成，例如，在 Alpha-Beta 765 kv 线路。

图 8 显示的数据来自图 7，但现在用来表示线路流动或者产生的无功功率，以与最大无功功率的比例显示，并产生一个排名。“% of max Q flow”表示从线路中流进或流出的无功功率最小值。“% of max Q generation”表示无功功率的总和。

图 8 确认无功功率的产生，在 Beta 和 Hydra 变电站，从 765 kv 线路流过 765/400 kv 变压器，更进一步到底层 400 kv 网络，如图所示的紫色线。

图 8 还显示了 Beta-Perseus-Hydra, Hydra-Kronos-Aries-Helios-Juno-Aurora 和 Hydra-Droërivier-Bacchus-Muldersvlei 的 400 kv 线路传输超过 200 MVar 的无功功率，用灰色线表示。

4.1.2. 轻载条件

图 9 显示了在 2006 年，轻负荷情况下的最大无功功率，突发事件由表 3 列出。用与绘制高负荷情况的方法来绘制此结果。

通过 Alpha 和 BETHA 765 kV 的电抗器切换来解决轻载情况。这缓解了 Beta 变电站 765/400 kV 变压器，Beta-Perseus 线路，Perseus 变电站的无功情况。可见，系统正常情况下和无功功率最大的情况之间并没有显著差异。由此可以得出结论，在轻载情况下，无功功率对突发事件不敏感。

图 10 显示了各个线路端口、变压器和 SVC 的最大和最小无功功率。正值表示无功功率流入。第一个变电站描述的名称，是“从”总线(黑色曲线)，第二个变电站是“到”总线(蓝色曲线)。

图 11 显示的数据来自图 10，但现在用来表示为线路流动或者产生的无功功率，以与最大无功功率的比例显示，产生一个排名。“% of max Q flow”表示从线路中流进或流出的无功功率最小值。“% of max Q generation”表示无功功率的总和。

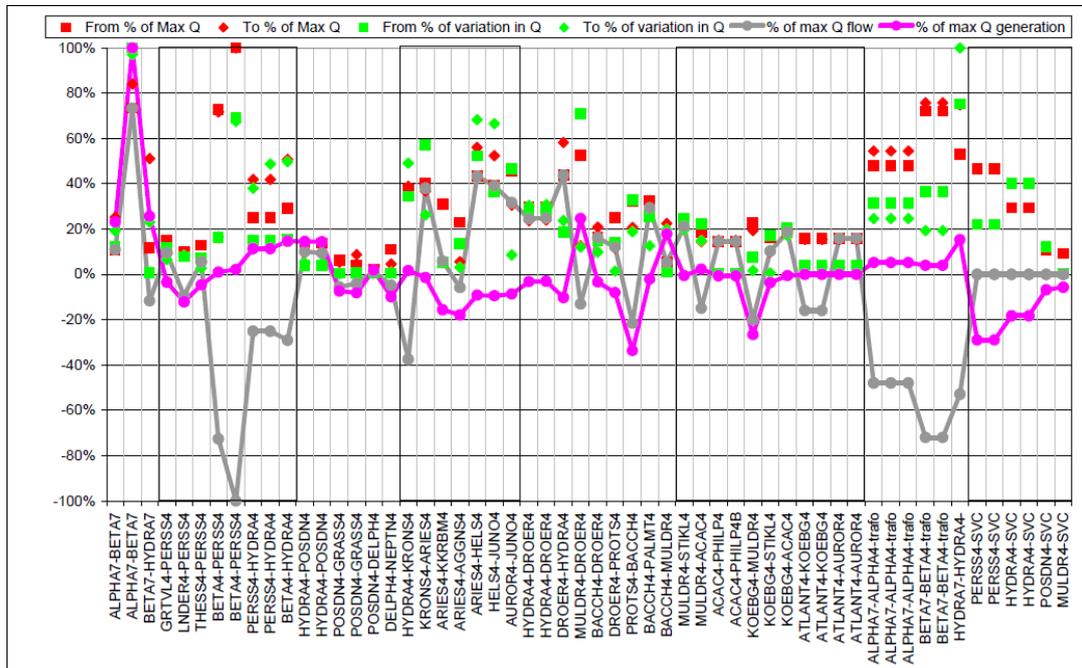


Figure 8. The reactive power flows and generation of 2006 high load
 图 8. 2006 年高负载情况下的无功功率的流动和产生

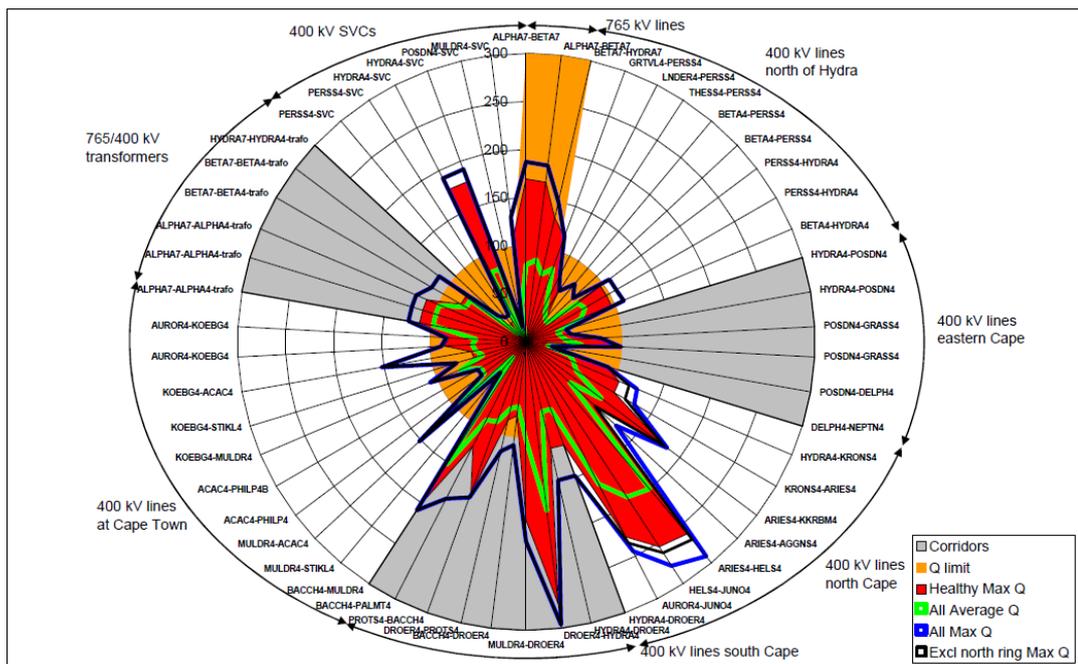


Figure 9. The maximum reactive power flows of 2006 light load
 图 9. 2006 年轻载情况下的最大无功功率

图 11 可以看出，在网络的北部显示出了很高的无功功率。

4.2. SVC 电压设定值对无功功率流的影响

图 12 显示了在 2006 年高负载情况下的无功功率流动，在系统正常工作时，不同的 SVC 电压设定值

Table 3. List of contingencies and associated losses for 2006 light load case
表 3. 2006 年轻载情况下的突发事件和相关的损耗清单

Contingency	Difference in losses From System Healthy [MW]	Difference in losses Based on System Health [%]
System Health		
Alpha-Beta 765	22	3%
Beta-Hydra 765	27	4%
Beta-Perseus 400	0	0%
Beta-Hydra 400	5	1%
Preseus-Grootvlei 400	6	1%
Preseus-Hydra 400	4	1%
Hydra-Droerivier 400-3	1	0%
Droerivier-Proteus 400	5	1%
Droerivier-Bacchus 400	1	0%
Droerivier-Muldersvlei 400	1	0%
Muldersvlei-Bacchus 400	1	0%
Muldersvlei-Acacia 400	0	0%
Acacia-Koeberg 400	9	1%
Aurora-Juno 400	-2	0%
Hydra-Kronos 400	14	2%

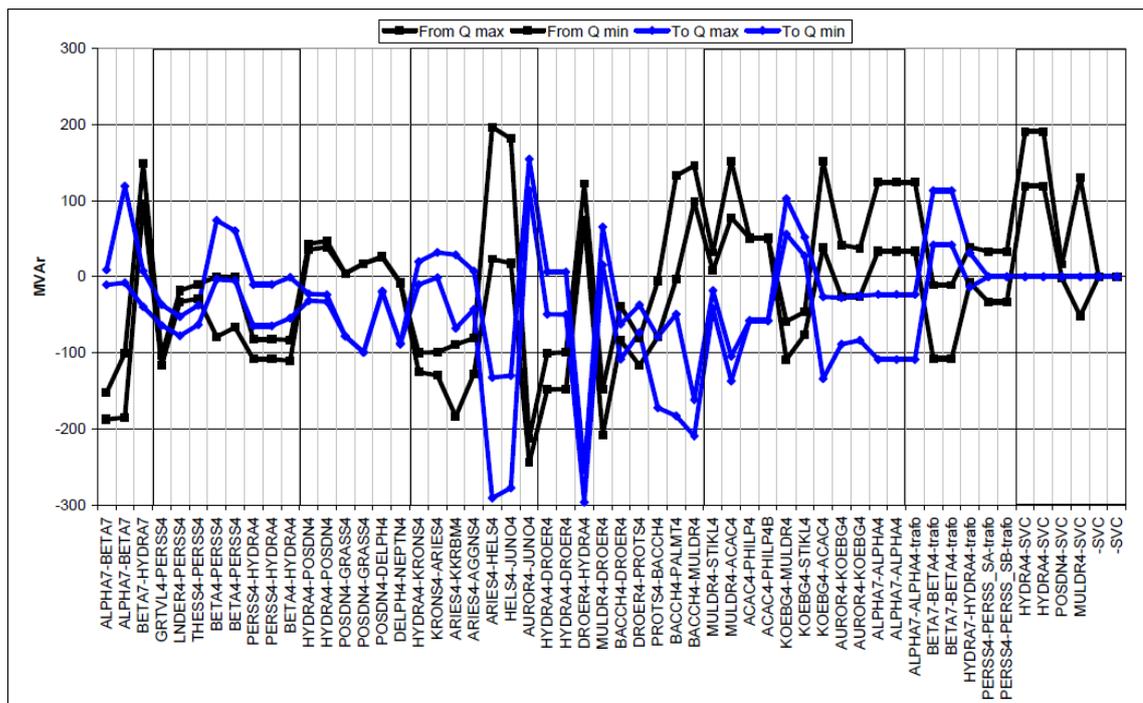


Figure 10. The maximum and minimum reactive power flows of 2006 low load
图 10. 2006 年轻载情况下的最大和最小的无功功率

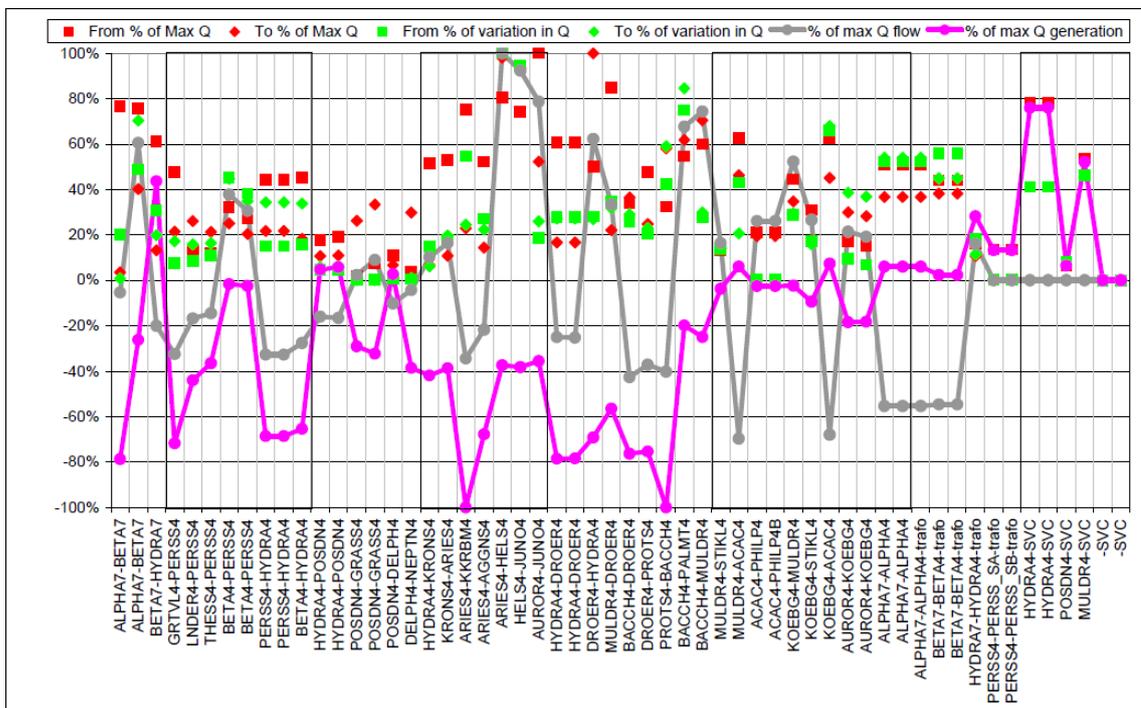


Figure 11. The reactive power flows and generation of 2006 light load
 图 11. 2006 年轻载情况下的无功功率流动和产生

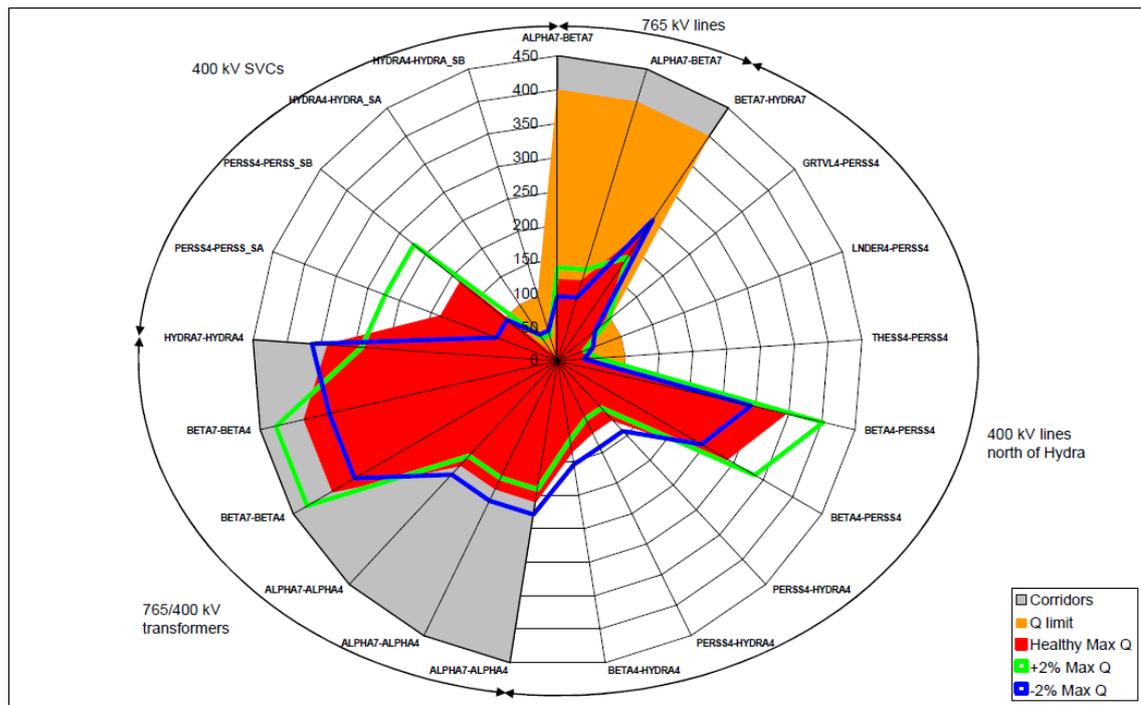


Figure 12. The reactive power flows with different SVC set-points in 2006 high load case
 图 12. 2006 年高负载情况下在不同 SVC 设定点下的无功功率

由表 4 列出。在系统正常工作时,Perseus 的 SVC 为容性。Perseus SVC 产生的无功功率,主要通过 Perseus-Beta 400 kv 线路, Beta 400/765 kv 变压器流入到 Beta 变电站的 765 kv 并联电抗器。可以确定 Perseus SVC 电压

设置点的调低，减少了它的容性输出，它也确实增加了网络其他部分的无功功率，反之亦然，Perseus SVC 电压设置点的调高，增大了它的容性输出，减少网络其他部分的无功功率，从而使整体损耗减少[4]。

改变 Perseus 处 SVC 的电压设置点，这并不是一个非常有效的方法去控制 Perseus-Beta 400 kV 线路和 Beta400/765 kV 变压器上的无功功率。对于每个 SVC 的输出，2%的电压变化会导致 100 MVAr 的差异，流经 Perseus-Beta 的每个 400 kv 线路都改变了 50 MVAr，而 Beta 变电站的每个变压器改变 35 MVAr。图 13 可以看出，随着 SVC 电压设置点的变化，Beta 400 kV 和 765 kV 线路总线电压会跟随着 Perseus 400 kV 线路总线电压变化。

4.3. 分接开关点对无功功率流的影响

图 14 显示了 2006 年在高负荷和正常运行情况下，对不同的分接开关设定值对应的无功功率，设置点见表 5。在系统正常运行时，Perseus SVC 输出为容性，Perseus SVC 产生的无功功率，主要通过 Perseus-Beta 400 kv 线路，Beta 400/765 kv 变压器流入到 Beta 变电站的 765 kv 并联电抗器。改变分接开关的位置，使 765/400 kv 变压器变化 2%，SVC 减少了容性输出。通过改变抽头位置，两个电压之间的差距减小，因而减少了 400 kv 和 765 kv 网络之间的无功功率流动。通过这样来减少 400 kv 和 765 kv 网络间的无功功率比改变 SVC 设置点，能减少更多的整体损耗。

对于控制流过 Perseus-Beta 400 kV 线路和 Beta 400/765 kV 变压器的无功功率，改变 Beta765 kv 变压器的分接头触点，比改变 Perseus SVC 的电压设置点更有效。2%的抽头切换，对于每个 SVC 会导致 35 MVAr 无功输出，同时，通过 Perseus-Beta 400 kv 线路的无功功率变化 62 MVAr，且 Beta 400/765 kV 变压器也会改变 65 MVAr。图 15 还表明，当 Beta 400 kv 电压跟随分接头触点变化时，Beta 400 kv 母线电压会跟随 Perseus 400 kv 母线电压的变化。

4.4. 未来的无功功率流

2010 年和 2012 年高负载情况下，只有一个 Koeberg 发电机在网络中，用这个案例来分析确定未来网络上预期的无功功率。当 AEG SVC 控制升级和 765 kv 系统扩展到 Cape Town 时，这为其提供了一种预测无功功率流动的依据。

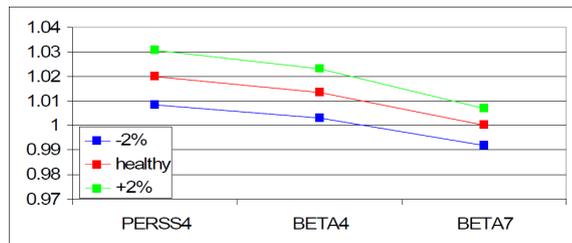


Figure 13. The busbar voltages for different SVC voltage set-points in 2006 high load case

图 13. 2006 年高负载情况下，不同 SVC 电压设置点对应的总线电压

Table 4. List of SVC voltage set-points and associated losses for 2006 high load case

表 4. 2006 年高负载情况下 SVC 电压设置点列表和相关的损耗

Contingency	Difference in losses from System Healthy [MW]	Difference in losses based on System Healthy [MW]
System Healthy		
Perseus SVC -2%	7	0.60%
Perseus SVC +2%	-6	-0.50%

Table 5. List of tap-changer set-points and associated losses for 2006 high load case
表 5. 2006 年高负载情况下，分接头触点值的列表和相关的损耗

Contingency	Difference in losses from System Healthy [MW]	Difference in losses based on System Healthy [MW]
System Healthy		
Beta 765/400 kV -2%	2	0.10%
Beta 765/400 kV +2%	-1	-0.10%

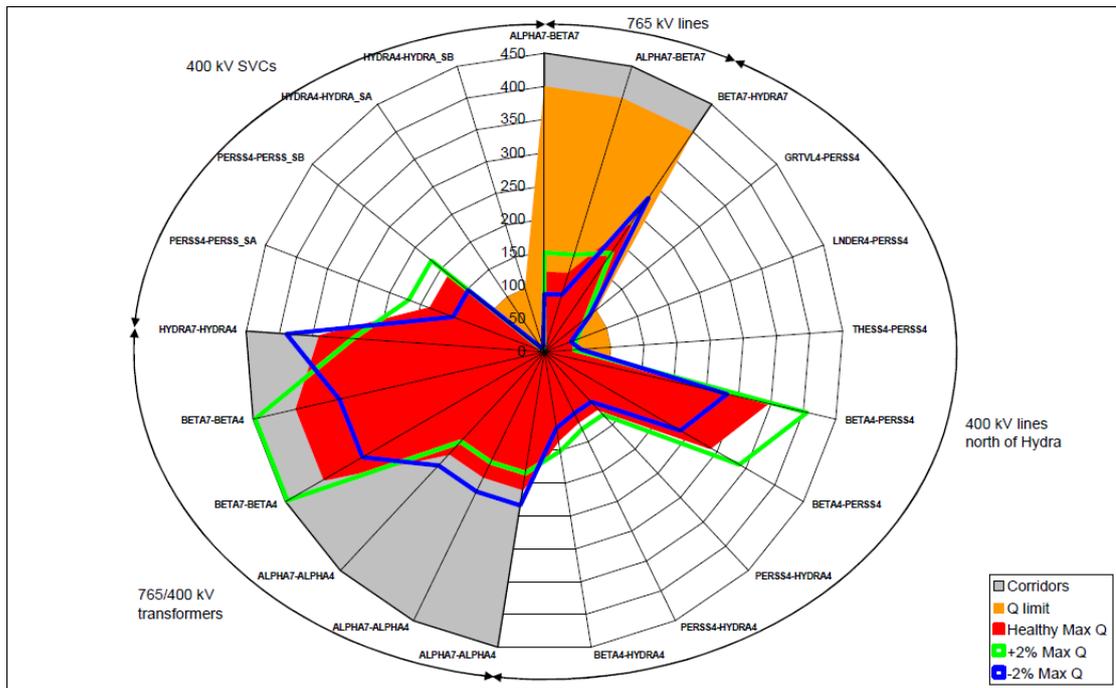


Figure 14. The reactive power flows with different SVC set-points in 2006 high load case
图 14. 2006 年高负载情况下，不同 SVC 设置点时的无功功率

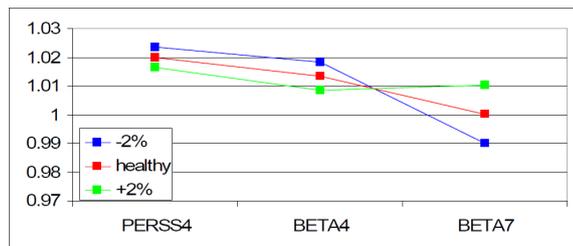


Figure 15. The busbar voltage with different tap-changer set-points in 2006 high load case
图 15. 2006 年高负载情况下，不同分接头触点值对应的母线电压

4.4.1. 2010 高负载情况

图 16 显示的最大无功功率是 2010 年的突发事件，这些时间由表 6 中列出。使用与 2006 年高负载情况同样的绘制方法。从下面的线路可以很明显看出，变压器和 SVC 有很高的无功功率。

Beta-Perseus 的 400 kV 和 765 kV 线路有无功功率流动。经常由 765 kV 线路产生，在 Beta 和 Perseus 的电抗器和 SVC 中流动。如图所示，这也被 Beta 和 Perseus 变电站 765/400 kV 变压器的无功证实了。此

曲线不包括 765 kv 线路的突发事件，它显示了从完整应急结果列表中得出的变化。可以清楚看到，尽管 765 kv 线路增强了网络，但在突发事件发生时，它却向并行网络中注入了无功功率。

图 17 显示了在各自线路、变压器和 SVC 中的最大和最小无功功率，正值表示无功功率的流入。第一个变电站描述名称为“从”总线(黑色曲线)，而第二个变电站是“到”总线(蓝色曲线)。基本曲线(红色和蓝色)为系统正常时的无功功率流。

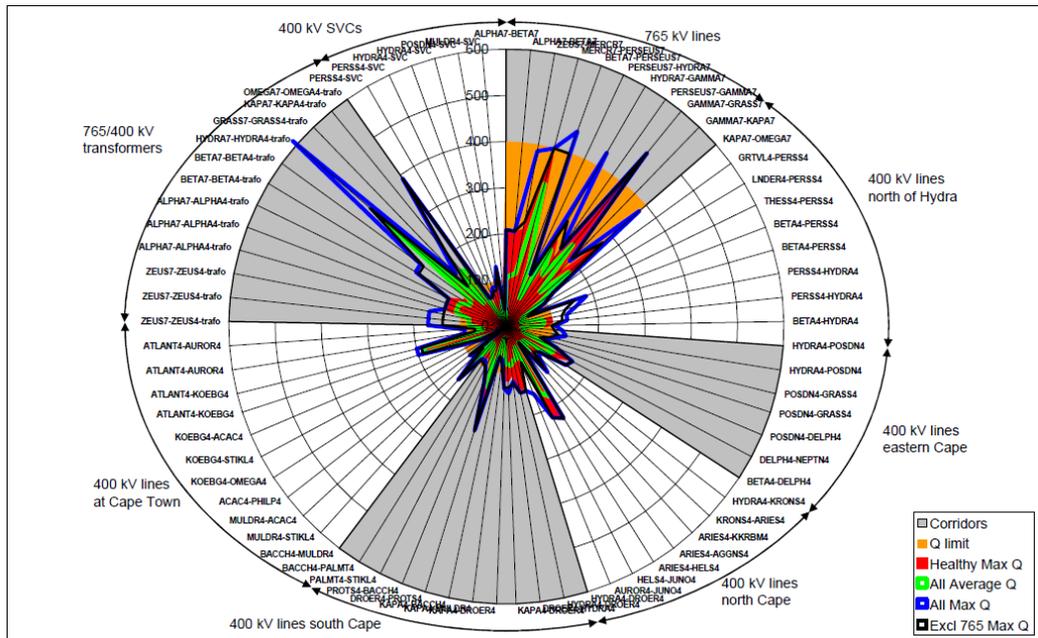


Figure 16. The maximum reactive power flows in 2010 light load case

图 16. 2010 年轻载情况下的最大无功功率

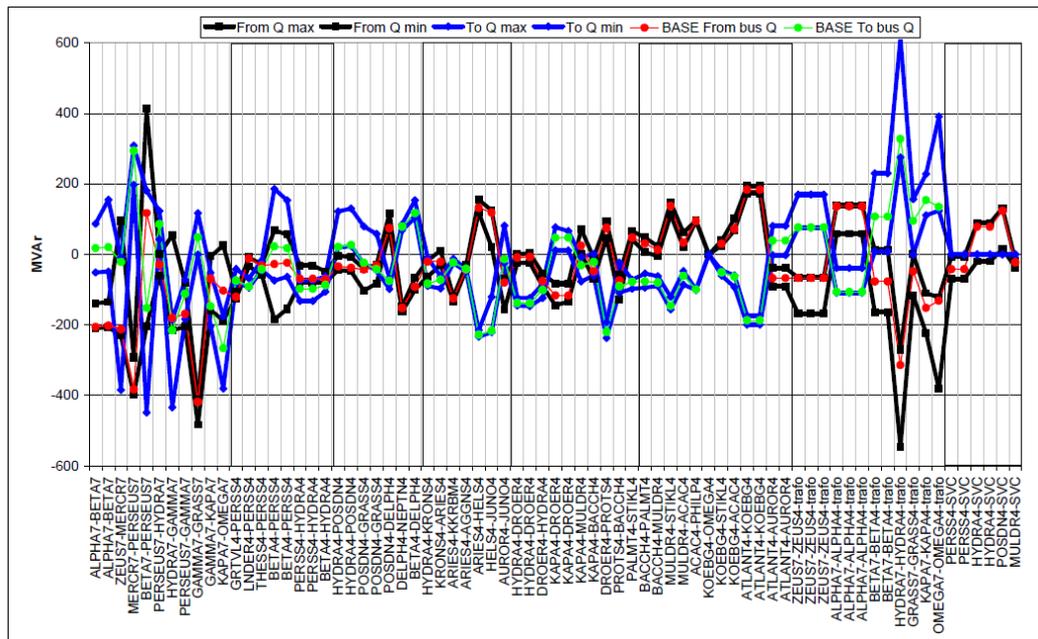


Figure 17. The maximum and minimum reactive power flows in 2010 low load case

图 17. 2010 年轻载情况下的最大和最小的无功功率

Table 6. List of contingencies and associated losses for 2010 light load case
表 6. 2010 轻载情况下的突发事件和相关的损耗

Contingency	Difference in losses from System Healthy [MW]	Difference in losses based on System Healthy [MW]
System Health		
Zeus-765400 trafo	0	0%
Acacia-Koeberg 400	4	0%
Alpha-Beta 765	14	1%
Aurora-Juno 400	12	1%
Beta-765400 trafo	-2	0%
Beta-Hydra 400	1	0%
Beta-Perseus 765	4	0%
Beta-Persus 400	0	0%
Droërivier-Proteus	3	0%
Droërivier-Kapa 400	0	0%
Gamma-Grassridge 765	85	6%
Gamma-Hydra 765	6	0%
Gamma-Kapa 765	3	0%
Gamma-765400 trafo	83	6%
Hydra-Droërivier 400-3	0	0%
Hydra-Kronos 400	14	1%
Kapa-765400 trafo	0	0%
Kapa-Bacchus 400	0	0%
Kapa-Muldersvlei 400	0	0%
Kapa-Omega 765	2	0%
Zeus-Mercury 765	24	2%
Muldersvlei-Acacia 400	0	0%
Muldersvlei-Bacchus 400	0	0%
Omega-765400 trafo	2	0%
Perseus-765400 trafo	-1	0%
Perseus-Gamma 765	11	1%
Perseus-Grootvlei 400	2	0%
Perseus-Hydra 400	1	0%
Perseus-Hydra 765	9	1%
Perseus-Mercury	25	2%

突发事件时的最大无功功率，又一次的发生在连接 Beta，Perseus 和 Hydra 变电站的设备上。

图 18 数据来自图 17，但现在用来表示线路中流动的或者产生的无功功率，以与最大值的百分比显示。显示的结果可以看出排名，最高的值为 100%。“% of max Q flow”表示从线路中流进或流出的无功功率

最小值。“% of max Q generation”表示无功功率的总和。最高的功率流动发生在 Mercury-Perseus 和 Perseus-Beta 765 kv 线路以及 Hydra 和 Omega 765/400 kv 变压器中,而最高无功功率产生在 Zeus-Mercury, Hydra-Gama 和 KapaOmega 765 kv 线路。

4.4.2. 2012 高负载情况

图 19 显示了 2012 年,高负载情况下的最大无功功率,突发事件由表 7 所示。同样的绘制方法用于

Table 7. List of contingencies and associated losses for 2012 high load case
表 7. 2012 年高负载情况下的突发事件和相关的损耗清单

Contingency	Difference in losses from System Healthy [MW]	Difference in losses based on System Healthy [MW]
System Health		
Acacia-Koeberg 400	3	0%
Alpha-Beta 765	80	5%
Aurora-Juno 400	-9	0%
Beta-765400 trafo	-4	0%
Beta-Hydra 400	27	2%
Beta-Perseus 765	55	3%
Beta-Persus 400	1	0%
Droërivier-Proteus	43	3%
Droërivier-Kapa 400	22	1%
Gamma-Grassridge 765	37	2%
Gamma-Hydra 765	75	4%
Gamma-Kapa 765	172	10%
Gamma-765400 trafo	9	1%
Hydra-Droërivier 400-3	12	1%
Hydra-Kronos 400	80	5%
Kapa-765400 trafo	1	0%
Kapa-Bacchus 400	21	1%
Kapa-Muldersvlei 400	18	1%
Kapa-Omega 765	84	5%
Muldersvlei-Acacia 400	2	0%
Muldersvlei-Bacchus 400	-1	0%
Omega-765400 trafo	7	0%
Perseus-765400 trafo	-3	0%
Perseus-Gamma 765	147	9%
Perseus-Grootvlei 400	18	1%
Perseus-Hydra 400	24	1%
Perseus-Hydra 765	146	9%
Perseus-Mercury	158	9%
Zeus-765400 trafo	8	0%
Zeus-Mercury 765	161	9%

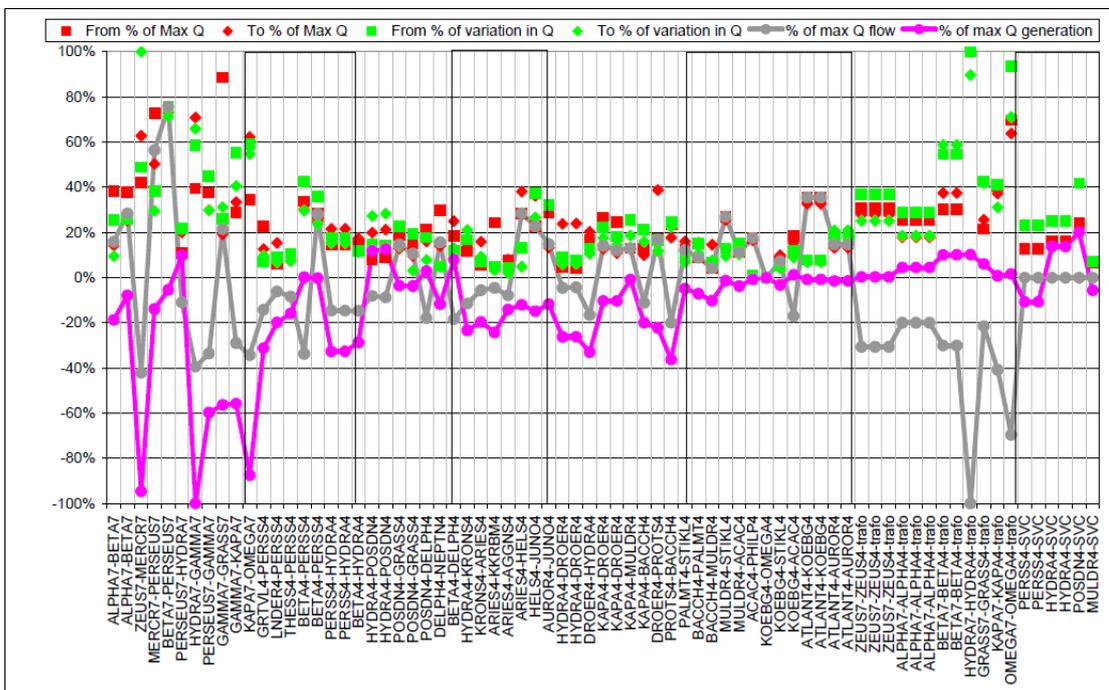


Figure 18. The reactive power flows and generator in 2010 light load case

图 18. 2010 年轻载情况下的无功功率流动和产生

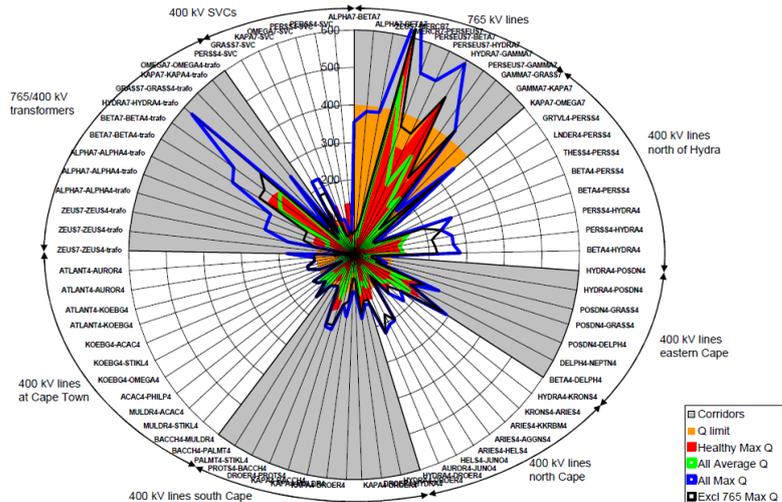


Figure 19. The maximum reactive power flows in 2012 high load case

图 19. 2012 年高负载情况下的最大无功功率

2006 年高负载情况。

Beta-Perseus 765 kV 和 400 kV 线路总是有很高的无功功率流动。这是由 765 kV 线路，和流向 400 kV 电抗器，Perseus SVC 的无功功率造成的。如图所示，这也被 Beta 和 Perseus 变电站 765/400 kV 变压器的无功证实了。此曲线不包括 765 kV 线路的突发事件，它显示了从完整应急结果列表中得出的变化。可以清楚看到，尽管 765 kV 线路增强了网络，但它在突发事件发生时，向并行网络中注入了无功功率。

图 20 显示了各个线路，变压器和 SVC 的最大和最小无功功率流。正值表明无功功率的流入。第一个变电站的描述名称是“从”总线(黑色曲线)，而第二个变电站是“到”总线(蓝色曲线)。基本曲线(红色

和蓝色)系统正常运行时的无功功率流。

在 2012 年案例, 所有线路都对无功功率敏感。

图 21 的数据来自 20, 但现在用来表示为线路中流动的或者产生的无功功率, 以与最大值的百分比显示。显示的结果可以看出排名, 最高的值为 100%。“% of max Q flow”表示从线路中流进或流出的无功功率最小值。“% of max Q generation”表示无功功率的总和。最高的功率流动发生在 Mercury-Perseus 和 Perseus-Beta 765 kv 线路以及 Hydra 和 Omega 765/400 kV 变压器中, 而最高无功功率产生在 Zeus-Mercury,

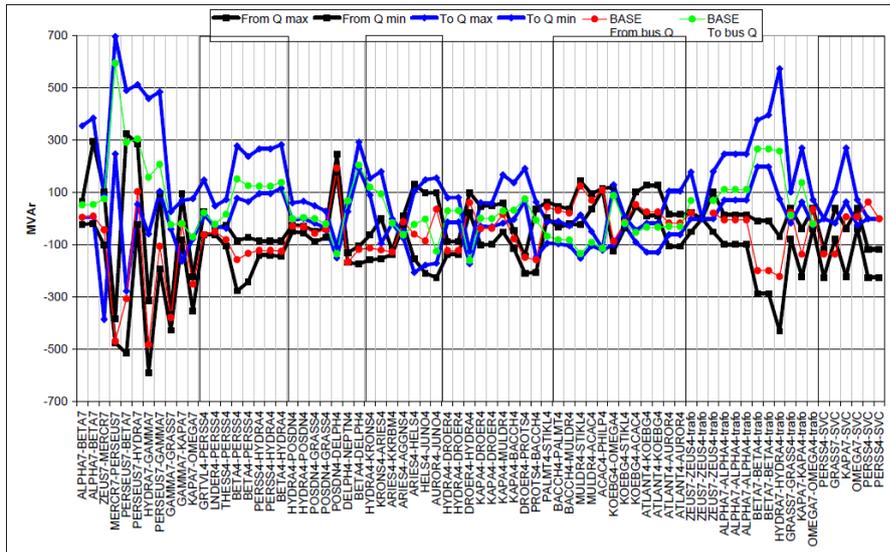


Figure 20. The maximum and minimum reactive power flows in 2012 high load case
图 20. 2012 年高负载情况下的最大和最小无功功率

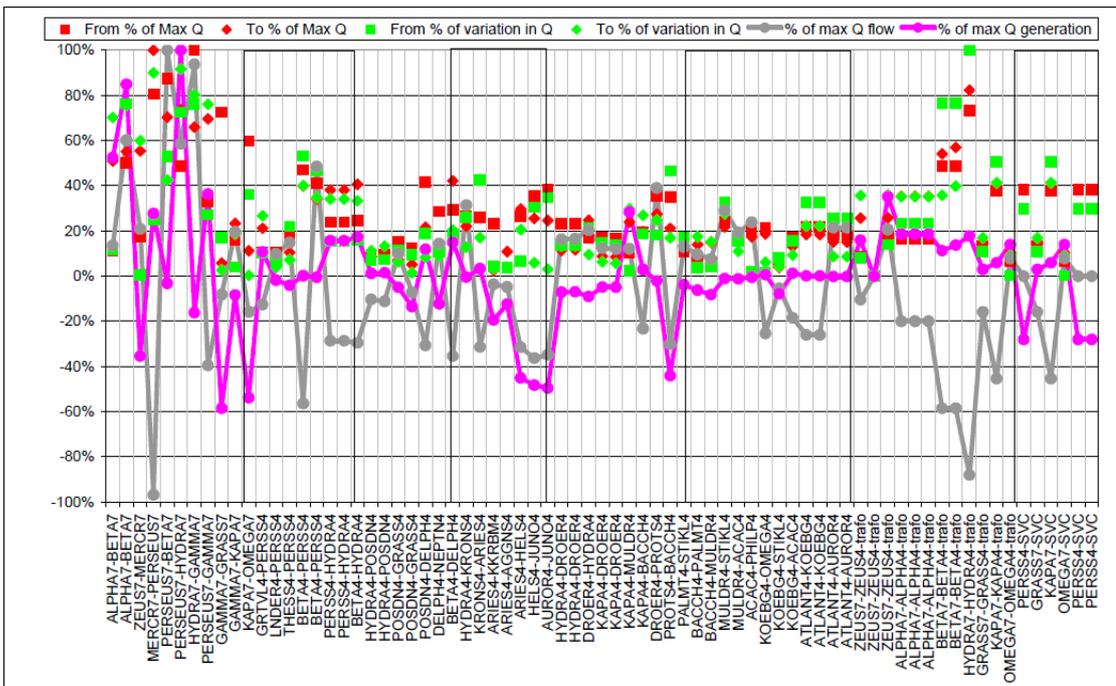


Figure 21. The reactive power flows and generator for 2012 high load
图 21. 2012 年高负载情况下的无功功率流动和产生

Hydra-Gama 和 KapaOmega 765kv 线路。

4.5. SVC 电压设定值对无功功率流的影响

图 22 显示了在 2012 年高负载情况下的无功功率流动，在系统正常工作时，不同的 SVC 电压设定值由表 8 列出。在系统正常工作时，Perseus 的 SVC 为容性。Perseus SVC 产生的无功功率，主要通过 Perseus-Beta 400/765 kv 变压器流入 765 kv 网络。可以确定 Perseus SVC 电压设置点的调低，减少了它的容性输出，它也确实增加了网络其他部分的无功功率，导致整体损耗的增加，反之亦然，Perseus SVC 电压设置点的调高，增大了它的容性输出，减少网络其他部分的无功功率，从而使整体损耗减少。

改变 Perseus 处 SVC 的电压设置点，这并不是一个非常有效的方法去控制 Perseus-Beta400/765 kV 变压器上的无功功率。Perseus-Beta 400 千伏线路和测试 400/765 kV 变压器。对于每个 SVC 的输出，2% 的电压变化，会导致 100 MVAr 的差异，流经 Perseus 400/765 kv 改变了 45 MVAr，而 Beta 变电站的每个变压器改变 30 MVAr。图 23 可以看出，随着 SVC 电压设置点的变化，Beta 400 kV 和 765 kV 线路总线电压会跟随着 Perseus 400 kV 线路总线电压变化。

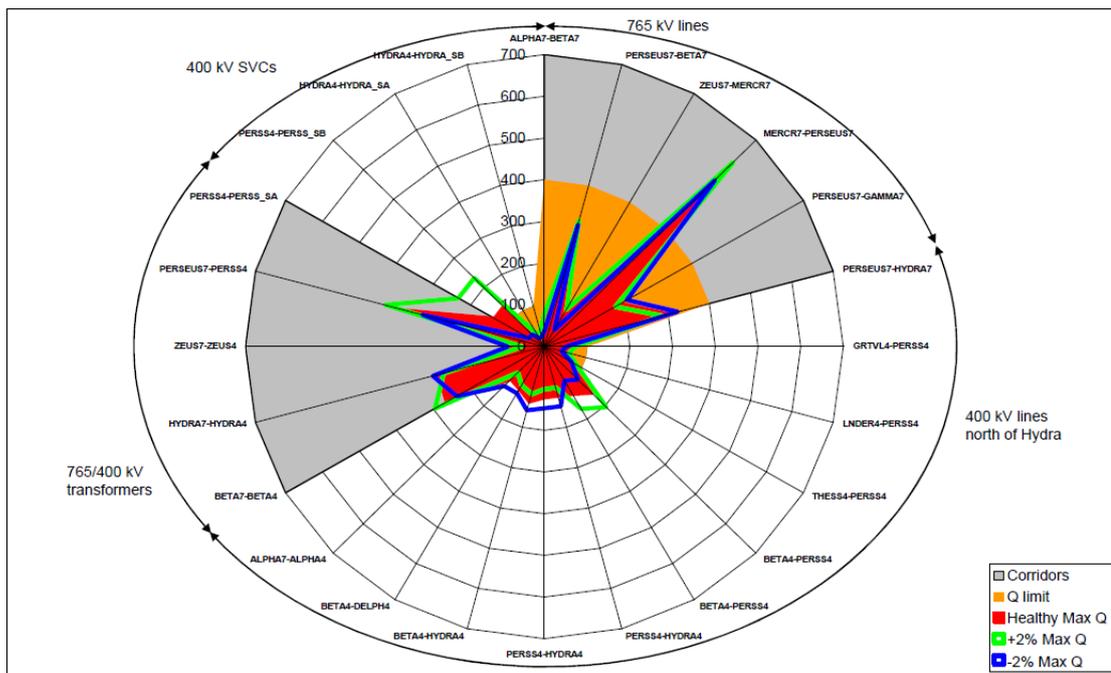


Figure 22. The reactive power flows with different SVC set-points in 2012 high load case
图 22. 2012 年高负载情况下，不同的 SVC 设定点对应无功功率

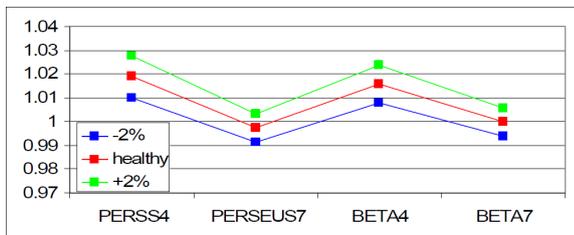


Figure 23. The busbar voltage with different SVC set-points in 2012 high load case
图 23. 2012 年高负载情况下，不同 SVC 设置地对应的总线电压

4.6. 分接开关点对无功功率流的影响

图 24 显示了 2012 年在高负荷和正常运行情况下，对不同的分接开关设定值对应的无功功率，设置点见表 9。在系统正常运行时，Perseus SVC 输出为容性，Perseus SVC 产生的无功功率，主要通过 Perseus-Beta 400/765 kv 变压器流入到 765kv 网络中。改变分接开关的位置，使 765/400 kv 变压器变化 2%，SVC 减少了容性输出。通过改变抽头位置，两个电压之间的差距减小，因而减少了 400 kv 和 765 kv 网络之间的无功功率流动。通过这样来减少 400 kv 和 765 kv 网络间的无功功率比改变 SVC 设置点，能减少更多的整体损耗[5]。

对于控制流过 Perseus-Beta 400 kV 线路和 Beta 400/765 kV 变压器的无功功率，改变 Beta765 kv 变压

Table 8. List of SVC set-points and associated losses for 2012 high load case
表 8. 2012 年高负载情况下，无功补偿器的设置点和相关的损耗清单

Contingency	Difference in losses from System Healthy [MW]	Difference in losses based on System Healthy [MW]
System Healthy		
Perseus SVC -2%	9	0.50%
Perseus SVC +2%	-8	-0.50%

Table 9. List of tap-changer set-points and associated losses for 2012 high load case
表 9. 2012 年高负载情况下，改变分接开关设定点和相关损耗

Contingency	Difference in losses from System Healthy [MW]	Difference in losses based on System Healthy [MW]
System Healthy		
Perseus&Beta 765/400kV -2%	3	0.20%
Perseus &Beta 765/400kV +2%	-2	-0.10%

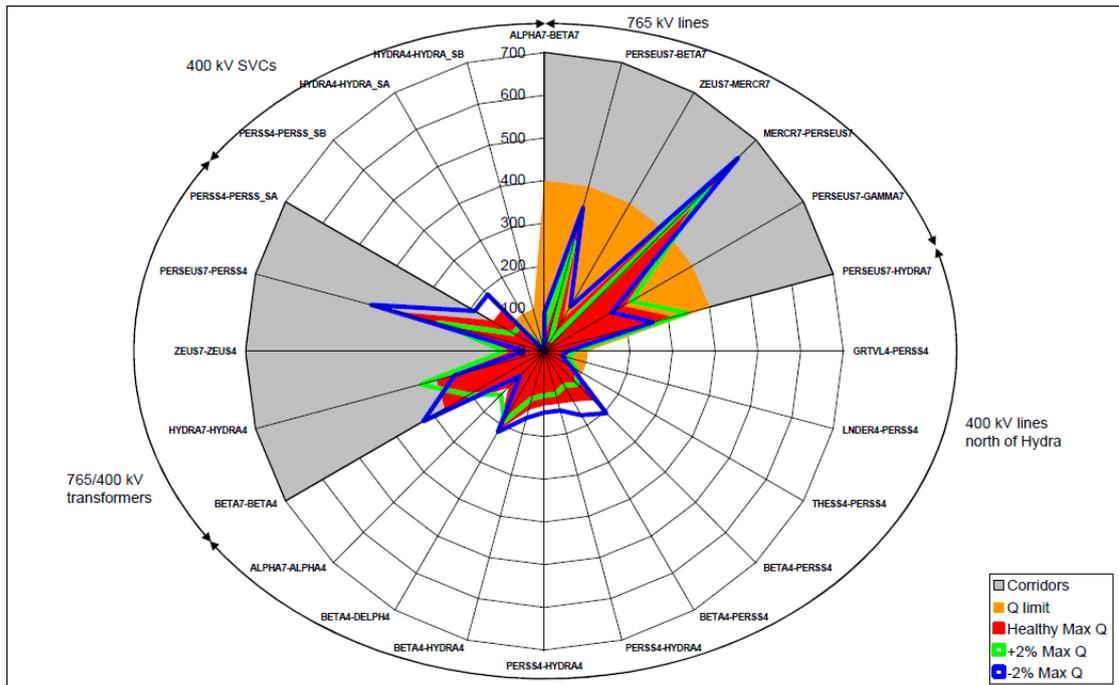


Figure 24. The reactive power flows with different SVC set-points in 2012 high load case
图 24. 2012 年高负载情况下，SVC 不同设定点对应的无功功率

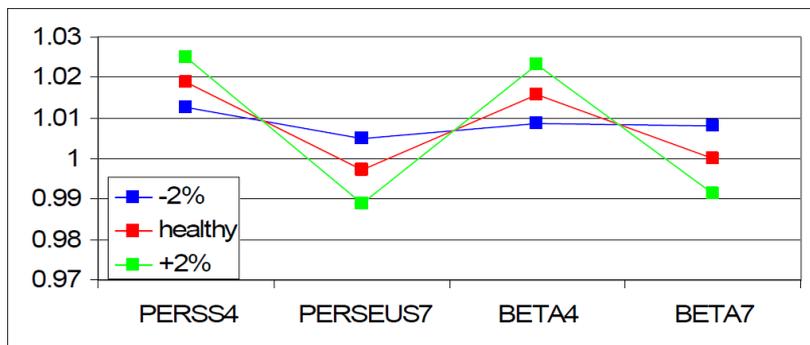


Figure 25. The busbar voltage with different tap-changer set-points in 2012 high load case

图 25. 2012 年高负载情况下，不同分接开关设定点对应的母线电压

器的分接头触点，比改变 Perseus SVC 的电压设置点更有效。2%的抽头切换会导致 52 MVar 无功输出对于每个 SVC，同时，通过 Perseus400/765 kV 变压器的无功功率变化 82 MVar，Beta 400/765 kV 变压器变化 62 MVar。图 25 还表明，当 Beta 400 kv 电压跟随分接头触点变化时，Beta 400 kv 母线电压会跟随 Perseus 400 kv 母线电压的变化。

5. 结论

从得到的潮流结果来看，很明显，与并行的 400 kv 系统相比，765 kv 系统的无功功率占主导地位。此外，接近 Perseus 和 Beta 变电站的网络，对无功功率的变化最敏感。敏感性分析的结果表明，控制 765 kv 和 400 kv 网络间无功功率的流动，通过调整 400/765 kV 变压器分接开关位置比通过调整 Perseus SVC 电压设定值更加有效。这归因于 400 kv 和 765 kv 网络之间共享 SVC 无功功率。另一方面，调整分接开关的方法会断开 400 kv 和 765 kv 网络，使得 400 kv 和 765 kv 网络的无功功率在管理上更加自主和独立。

参考文献 (References)

- [1] 李瑞生, 李燕斌, 周逢权 (2010) 智能变电站功能架构及设计原则. *电力系统保护与控制*, **21**, 4-6.
- [2] 胡毅 (2007) 输电线路运行故障分析与防治. 中国电力出版社, 北京.
- [3] 康重庆, 夏清, 张伯明 (2004) 电力系统负荷预测研究综述与发展方向的探讨. *电力系统自动化*, **28**, 1-11.
- [4] 魏伟, 牛东晓 (2002) 负荷预测技术的新进展. *华北电力大学学报*, **29**, 10-15.
- [5] 赵明奇 (2005) 配电网规划研究. 东南大学, 南京.