

Power Grid Private Wireless Network White Paper

Março 2026



Prefácio

Atualmente, a rede elétrica está passando por uma dupla transformação sem precedentes de digitalização e integração de novas energias. Esse não é apenas um requisito fundamental para atingir as metas de energia verde e construir um novo sistema de energia, mas também uma medida fundamental para otimizar a estrutura de energia e garantir a segurança energética. Nessa transformação, a rede de comunicação de energia, que serve como o "sistema nervoso" da rede elétrica, desempenha um papel crítico na transmissão de dados, entrega de comando e monitoramento de status. A qualidade de sua construção determina diretamente o sucesso da transformação da rede elétrica e a operação estável do novo sistema de energia.

Como a "última milha" que conecta a rede principal aos usuários finais, a rede de distribuição é o principal campo de batalha para a digitalização e a integração de novas energias, e também o cenário com as necessidades de comunicação mais proeminentes e urgentes. As características únicas da rede de distribuição, como a distribuição de nós, as condições de operação e manutenção e as tendências de desenvolvimento impõem requisitos extremamente altos e abrangentes à rede de comunicação.

As redes sem fio privadas, com suas principais vantagens de segurança, confiabilidade, flexibilidade, eficiência e economia, atendem perfeitamente a todas as necessidades de comunicação em cenários de rede de distribuição, tornando-o uma das melhores soluções para superar gargalos de comunicação em redes de distribuição e apoiar a dupla transformação da rede elétrica.

Conteúdo

Prefácio	0
1. Desafios da transformação da rede elétrica.....	2
1.1 Requisitos para Rede de Comunicação.....	2
1.2 Características dos Cenários da Rede de Distribuição.....	3
1.3 Requisitos para Cenários de Rede de Distribuição.....	3
2. Adaptabilidade de redes sem fio privadas.....	5
2.1 Alta segurança.....	5
2.2 Alta confiabilidade.....	6
2.3 Implantação flexível.....	6
2.4 Transmissão eficiente.....	6
3. Seleção para Redes Sem Fio Privadas.....	7
3.1 Princípios para Seleção de Faixa de Frequência.....	7
3.2 Vantagens da faixa de frequência de 450 MHz.....	8
4. Sugestões para implantação de redes sem fio privadas.....	10
4.1 Para consideração sobre implantação de rede privada.....	10
4.2 Perspectivas para aplicativos de rede sem fio privada.....	11
5. Conclusão	12

dimensionar e proporcionar conexões de terminais, permitindo a conexão simultânea de um grande número de terminais, atendendo aos requisitos de cobertura total, acesso total dos terminais de rede de distribuição.

Multisserviços: a rede de distribuição abrange vários serviços, incluindo controle, coleta de dados, operação e manutenção e provisionamento de serviços. Esses serviços têm requisitos significativamente diferentes para largura de banda de comunicação, latência e consumo de energia. A rede de comunicação deve possuir a capacidade de transmissão colaborativa multisserviço, permitindo a alocação flexível de recursos de rede para atender às necessidades diferenciadas de diferentes serviços. Isso facilitará a adoção de "uma rede para múltiplos propósitos", dando suporte à operação e manutenção inteligentes da rede de distribuição e à melhora de serviços de alta qualidade;

2. Adaptabilidade de redes sem fio privadas

Enfrentando os principais requisitos de comunicação dos cenários de rede de distribuição, entre várias soluções de tecnologia de comunicação, a rede privada de comunicação sem fio de energia se destaca devido às suas vantagens únicas, alcançando um alinhamento abrangente e de alta precisão com as necessidades de comunicação das redes de distribuição. Tornou-se a solução ideal para superar os gargalos de comunicação nas redes de distribuição. Suas principais vantagens se refletem em quatro aspectos principais: segurança, confiabilidade, flexibilidade e eficiência, atendendo perfeitamente às demandas de comunicação dos cenários de rede de distribuição.

2.1 Alta segurança

A rede privada de comunicação sem fio de energia utiliza bandas de frequência dedicadas e arquitetura de rede, completamente isoladas das redes de comunicação públicas, evitando efetivamente os riscos de segurança associados às redes públicas e alcançando "rede dedicada para uso dedicado e acesso exclusivo aos dados". A rede privada está equipada com um sistema abrangente de proteção de segurança, funções de suporte, como autenticação de identidade de terminal, dados criptografados

transmissão, controle de acesso e percepção da situação de segurança. Esse sistema pode se defender efetivamente contra várias ameaças de segurança, incluindo acesso não autorizado, adulteração de dados e ataques de hackers. Ele atende aos requisitos de proteção de segurança para infraestrutura crítica no setor de energia e se alinha perfeitamente com o requisito principal de "alta segurança" da comunicação da rede de distribuição.

2.2 Alta confiabilidade

As redes sem fio privadas são implantadas usando uma faixa de frequência dedicada, que não é afetada por flutuações no tráfego da rede pública ou interferência de sinal. Isso garante uma transmissão de sinal estável e fortes capacidades anti-interferência. Além disso, a rede dedicada pode otimizar sua arquitetura e caminhos de transmissão de acordo com as necessidades dos serviços de rede de distribuição, alcançando redundância e backup. Quando um caminho de transmissão falha, a rede pode mudar rapidamente para um caminho de backup, garantindo comunicação ininterrupta e atendendo aos requisitos de transmissão estáveis dos principais serviços, como automação de distribuição e isolamento de falhas, atendendo à demanda de "alta confiabilidade" da comunicação da rede de distribuição.

2.3 Implantação flexível

As redes sem fio privadas não exigem colocação de linha em larga escala, oferecendo implantação flexível e conveniente. Com base nas características de distribuição dos terminais na rede de distribuição, as estações base e os terminais de comunicação podem ser configurados de forma flexível para alcançar rapidamente a cobertura completa da rede de distribuição, tornando-o particularmente adequado para áreas como regiões rurais e montanhosas, onde a comunicação com fio é difícil de implantar. Em comparação com a comunicação de fibra tradicional, a rede de comunicação sem fio dedicada tem um ciclo de implantação mais curto e menor dificuldade de implementação, encurtando significativamente o período de implantação do sistema de comunicação da rede de distribuição e reduzindo os custos de construção. Além disso, quando novos terminais são adicionados, ou os existentes são realocados ou ajustados, a cobertura da rede dedicada e as configurações de acesso ao terminal podem ser rapidamente modificadas sem a necessidade de revisões de rede em larga escala. Isso se adapta bem às características "numerosas e amplamente distribuídas" dos terminais da rede de distribuição, atendendo às necessidades de adaptação flexível de "conectividade extensiva" e "multisserviços" na comunicação da rede de distribuição. Aproveitando a vantagem da implantação flexível, a rede dedicada pode superar rapidamente o gargalo de comunicação de "última milha" na rede de distribuição, permitindo acesso abrangente para um grande número de terminais.

2.4 Transmissão eficiente

As redes sem fio privadas apresentam altas taxas de transmissão e baixa latência de transmissão, alcançando latência de ponta a ponta no nível de milissegundos, que atende aos requisitos em tempo real dos principais serviços, como automação de distribuição e localização de falhas. a rede dedicada oferece suporte ao acesso

simultâneo de um grande número de terminais, possibilitando acesso e transmissão simultânea de dados para dezenas de milhares ou até centenas de milhares de terminais, atendendo assim às necessidades de "conectividade massiva" da rede de distribuição. Além disso, a rede dedicada tem a capacidade de transmissão colaborativa multisserviço, permitindo a alocação flexível de recursos de rede, como largura de banda e latência, de acordo com as necessidades de diferentes serviços. Isso garante os requisitos de transmissão de vários serviços, incluindo controle, coleta de dados e operação e manutenção, alcançar "uma rede para múltiplos propósitos", melhorando assim a eficiência e a utilização da comunicação da rede de distribuição e alinhando-se aos principais requisitos de "baixa latência, conectividade massiva e multisserviço" na comunicação da rede de distribuição.

Em resumo, as quatro principais vantagens das redes sem fio privadas se alinham totalmente às principais necessidades de comunicação do cenário da rede de distribuição, que incluem "alta segurança, alta confiabilidade, baixa latência, conectividade massiva, e multisserviços." Isso resolve efetivamente os gargalos de um grande número de nós de comunicação, ampla cobertura, difícil operação e manutenção e tendências de rápido desenvolvimento na rede de distribuição, fornecendo uma base de comunicação sólida para a atualização inteligente da rede de distribuição e a dupla transformação da rede elétrica.

3. Seleção para Redes Sem Fio Privadas

Na seleção de faixas de frequência para Redes Sem Fio Privadas, as principais características das redes de distribuição - "cobertura extensiva e cenários complexos de implantação" - são levadas em consideração. As bandas de baixa frequência, com suas vantagens de ampla cobertura, forte penetração e baixos custos de implantação, tornaram-se a escolha preferida para cenários de rede de distribuição. A padronização da faixa de frequência e a maturidade da cadeia industrial afetam diretamente a eficácia da implantação e o desenvolvimento de longo prazo da rede privada. Após uma comparação e avaliação abrangentes, a faixa de frequência de 450 MHz, com suas vantagens de baixa frequência, atributos padronizados e ecossistema maduro, tornou-se uma das melhores opções para redes sem fio privadas, atendendo perfeitamente às necessidades de implantação e aos requisitos de desenvolvimento de longo prazo dos cenários de rede de distribuição.

3.1 Princípios para Seleção de Faixa de Frequência

Considerando as características exclusivas e os requisitos de comunicação dos cenários de rede de distribuição, a seleção de faixas de frequência para Redes sem fio privadas deve aderir a três princípios fundamentais para garantir a adequação da faixa de frequência, a viabilidade da implantação e a estabilidade a longo prazo:

- O princípio de priorizar a baixa frequência. As redes de distribuição cobrem vastas áreas, especialmente em regiões rurais e montanhosas, onde o terreno é complexo e os terminais são amplamente dispersos. Esses cenários requerem faixas de frequência com ampla cobertura e fortes recursos de penetração para reduzir o número de estações base necessárias e reduzir os custos de construção e manutenção. Bandas de

baixa frequência têm comprimentos de onda de sinal mais longos, permitindo que percorram distâncias mais longas e penetrem através de obstáculos de forma mais eficaz. Isso permite uma cobertura eficiente de áreas remotas e regiões com terreno desafiador sem a necessidade de implantação de estação base em larga escala, combinando perfeitamente com a característica de "extensa cobertura" das redes de distribuição. Portanto, o princípio de priorizar a baixa frequência é um critério central para a seleção da faixa de frequência em cenários de rede de distribuição.

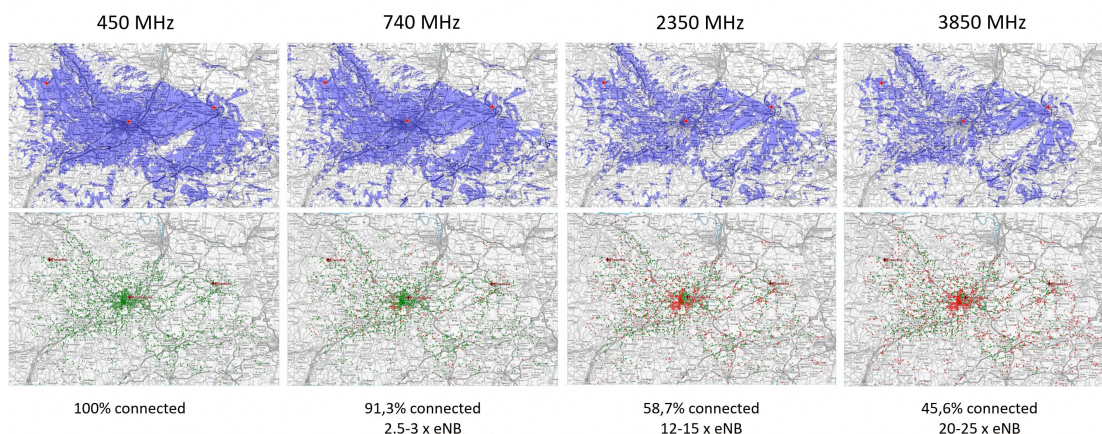
- O princípio da frequência padrão. A faixa de frequência deve estar em conformidade com os padrões nacionais e internacionais relevantes e possuir especificações técnicas e protocolos padronizados para garantir a compatibilidade e a interconectividade de equipamentos de diferentes fabricantes, evitando o "efeito ilha" e facilitando a implantação em larga escala, atualização e manutenção de redes privadas. Ao mesmo tempo, as faixas de frequência padrão têm planejamento e gerenciamento de espectro bem desenvolvidos, evitando efetivamente conflitos de frequência e garantindo a estabilidade e a segurança da transmissão do sinal da rede privada.

- O princípio de um ecossistema maduro. A faixa de frequências deve ser suportada por uma cadeia industrial completa, incluindo fornecimento maduro de vários dispositivos, como chips, módulos, estações base e terminais, bem como serviços técnicos profissionais e suporte à operação e manutenção, para garantir a viabilidade e a estabilidade de longo prazo da construção da rede privada. Uma cadeia industrial madura pode reduzir os custos de equipamentos, melhorar a eficiência da implantação e facilitar futuras atualizações de rede e iterações tecnológicas, apoiando assim o desenvolvimento de longo prazo da comunicação da rede de distribuição.

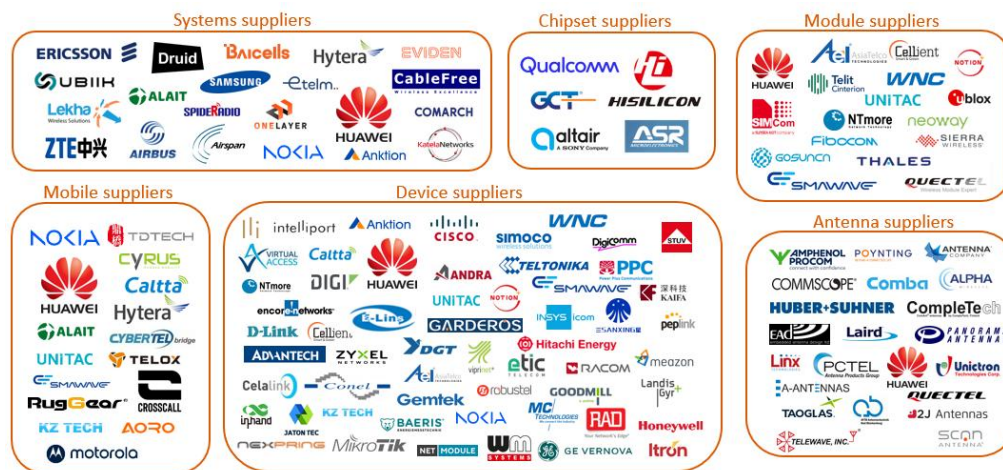
3.2 Vantagens da faixa de frequência de 450 MHz

A faixa de frequência de 450 MHz pertence à faixa de baixa frequência, e as faixas de frequência B31/72B87 são faixas de frequência dedicadas que estão em conformidade com os padrões 3GPP. Essa faixa de frequência tem uma cadeia industrial completa e atende totalmente aos três princípios fundamentais para a seleção de bandas de frequência em redes de distribuição. Suas principais vantagens se refletem principalmente nos quatro aspectos a seguir:

- A faixa de frequência de 450 MHz tem uma vantagem significativa na cobertura de baixa frequência, que é adequada às características de amplas áreas de cobertura da rede de distribuição. A faixa de frequência de 450 MHz tem um comprimento de onda mais longo, permitindo distâncias de transmissão mais longas e capacidades de penetração mais fortes. Uma única estação base pode cobrir uma área de vários quilômetros, que é de 3 a 5 vezes a cobertura de faixas de frequência mais altas, reduzindo significativamente o número de estações base necessárias. Isso o torna particularmente adequado para cobertura em áreas remotas, como regiões rurais e montanhosas. Em comparação com as faixas de frequência média, como 700 MHz e 800 MHz, a faixa de frequência de 450 MHz oferece cobertura mais ampla e menores custos de implantação, eliminando a necessidade de construção de estações base em larga escala e reduzindo efetivamente os custos de construção da rede de distribuição privada sem fio.



- A faixa de frequência de 450 MHz é uma frequência padronizada, com especificações 3GPP padronizadas e protocolos de comunicação. Os principais fabricantes de equipamentos nacionais e internacionais apoiam o desenvolvimento e a produção de dispositivos para essa faixa de frequência, permitindo a compatibilidade e a interconexão entre estações base, módulos e terminais de diferentes fabricantes. Isso evita problemas como incompatibilidade de dispositivo e incoordenação de rede. Além disso, a faixa de frequência padronizada possui um sistema de planejamento de espectro bem desenvolvido, prevenindo efetivamente conflitos com outras faixas de frequência, garantindo a estabilidade e a segurança da transmissão de sinal na rede privada de comunicação sem fio de energia. Isso facilita a implantação, a atualização e a manutenção em larga escala da rede privada, atender aos requisitos de "multi-service, conectividade em larga escala" da comunicação da rede de distribuição.
- A faixa de frequência de 450 MHz tem um ecossistema maduro, com fabricantes profissionais fornecendo produtos e serviços técnicos bem estabelecidos em toda a cadeia, desde chips e módulos até estações base e dispositivos terminais. A taxa de localização de chips e módulos dos principais fabricantes de equipamentos é alta, garantindo um amplo fornecimento de equipamentos econômicos e de alta qualidade. Essa cadeia madura da indústria reduz significativamente os custos de construção de redes privadas de comunicação sem fio para o setor de energia, encurta o ciclo de implantação, e facilita operações subsequentes de rede, atualizações de equipamentos e iterações tecnológicas, fornecendo uma base sólida para a operação estável de longo prazo de redes privadas.



- A banda de frequência 450 Mhz oferece excelentes taxas de transmissão e baixa latência, alcançando latência de ponta a ponta no nível de milissegundos e suportando o acesso simultâneo de um grande número de terminais. Esse recurso não apenas atende aos requisitos de baixa latência e alta confiabilidade de serviços orientados a controle, como automação de distribuição e isolamento de falhas, mas também atende às necessidades de alta conectividade e baixo consumo de energia dos serviços de coleta de dados, como a coleta de informações de eletricidade. Além disso, ele pode suportar as demandas de largura de banda de serviços de operação e manutenção, como inspeções por vídeo, permitindo "uma rede para múltiplos propósitos" e atendendo efetivamente às necessidades de transmissão colaborativa multisserviço em redes de distribuição.

4. Sugestões para implantação de redes sem fio privadas

4.1 Para consideração sobre implantação de rede privada

Considerando as características dos cenários de redes de distribuição, os requisitos de comunicação e as vantagens da faixa de frequência de 450 MHz, as seguintes recomendações de implantação são propostas para garantir a qualidade de construção e a eficácia operacional das Redes Sem Fio Privadas:

- Aderir ao princípio de implantação de "priorizar baixa frequência e manter padrões unificados". A implantação da rede de distribuição rede privada deve priorizar o uso da frequência padrão de 450 MHz, seguir rigorosamente os padrões 3GPP e os regulamentos relevantes do setor de energia e unificar a arquitetura de rede, os protocolos de comunicação e os padrões de equipamentos para garantir a compatibilidade e a interoperabilidade de equipamentos de diferentes regiões e fabricantes.
- Otimizar a arquitetura de rede para atender aos requisitos de serviço da rede de distribuição. Com base na distribuição de dispositivos terminais, tipos de serviço,

e características regionais, a arquitetura de rede da rede privada de comunicação sem fio de energia deve ser otimizada para estabelecer uma arquitetura de três camadas de "rede principal + rede de acesso + terminal". A rede principal deve adotar um modelo de implantação centralizado para obter programação e segurança de recursos gerenciamento em toda a rede.

- Reforçar a proteção de segurança para garantir a segurança da rede e dos dados. Siga rigorosamente os padrões de proteção de segurança do setor de energia para construir um sistema de proteção de segurança de rede dedicado abrangente e multicamadas. Este sistema implementará funções como autenticação de identidade de terminal, transmissão de dados criptografados, controle de acesso, conscientização da situação de segurança, e aviso antecipado de comportamentos anormais para se defender contra várias ameaças à segurança.
- Confiar em uma cadeia de indústria madura para controlar os custos de construção, operação e manutenção. Selecionar fabricantes de equipamentos e provedores de serviços com tecnologias maduras e ampla experiência e priorize o uso de chips, módulos, estações base e outros equipamentos produzidos internamente e econômicos. Ao aproveitar a cadeia industrial de 450 MHz, os custos de construção da rede dedicada podem ser reduzidos.

4.2 Perspectivas para aplicativos de rede sem fio privada

Com o aprofundamento contínuo da transformação digital da rede elétrica e a transição para a nova energia, o nível de inteligência da rede de distribuição continuará a melhorar. Como suporte principal para a comunicação da rede de distribuição, os cenários de aplicação da rede de comunicação sem fio dedicada continuarão a se expandir, e seu valor se tornará ainda mais proeminente.

Em termos de operação e manutenção da rede de distribuição, a rede dedicada suportará todo o processo inteligente de operação e manutenção da rede de distribuição. Por meio de funções como monitoramento remoto, inspeção de vídeo, localização automática de falhas e controle remoto, a rede dedicada reduzirá significativamente a carga de trabalho de inspeções manuais, melhorar a eficiência de operação e manutenção, reduzir os custos de operação e manutenção e facilitar a transição da "inspeção manual" para a "operação e manutenção inteligentes" no gerenciamento da rede de distribuição.

Em termos de integração de energia renovável, a rede de comunicação de energia dedicada suportará o controle coordenado de "geração-rede-carga-armazenamento", permitindo a transmissão em tempo real de dados de status operacional de novos tipos de terminais, como fotovoltaicos distribuídos, sistemas de armazenamento de energia, e pilhas de carregamento. Isso facilitará funções como previsão de produção de energia renovável, regulação do fluxo de energia e controle de carga-descarga de armazenamento de energia, aumentando assim a capacidade de integração de energia renovável, promovendo acesso em larga escala e utilização eficiente.

Em relação à evolução tecnológica, com o desenvolvimento do 5G e 6G, a Internet de

Coisas (IoT e inteligência artificial, a rede de comunicação de energia dedicada alcançará uma integração profunda com tecnologias como 5G e computação de borda, melhorando ainda mais a velocidade da rede, a latência e os recursos de conectividade para atender aos requisitos mais altos das atualizações inteligentes da rede de distribuição. Enquanto isso, a cadeia industrial de 450 MHz continuará a melhorar, com o desempenho do equipamento sendo continuamente otimizado e os custos ainda mais reduzidos, impulsionando a implantação em larga escala e a aplicação generalizada de redes de comunicação de energia dedicadas, tornando-as um suporte de comunicação essencial para a construção do novo sistema de energia.

5. Conclusão

Atualmente, a transformação digital das redes elétricas e a transição para a energia renovável entraram em uma fase crítica. Como principal campo de batalha para a transformação da rede elétrica, as necessidades de comunicação das redes de distribuição estão se tornando cada vez mais urgentes e únicas. A rede de comunicação de energia tornou-se uma infraestrutura central que suporta a dupla transformação da rede elétrica. As características dos cenários de rede de distribuição - como um grande número de nós, ampla cobertura e mudanças rápidas - determinam a alta demanda da rede por segurança, confiabilidade, baixa latência, grande conectividade e recursos multisserviços. A rede de comunicação de energia dedicada, com suas principais vantagens de segurança, confiabilidade, flexibilidade, eficiência e custo-benefício, atende totalmente às necessidades de comunicação das redes de distribuição, tornando-a a solução ideal para superar os gargalos de comunicação nas redes de distribuição.

Considerando a ampla cobertura das redes de distribuição, as soluções de comunicação caracterizadas por faixas de baixa frequência, pontos de frequência padrão e um ecossistema maduro tornaram-se a escolha preferencial para implantação. A solução de comunicação de 450 MHz se destaca por sua significativa vantagem em cobertura de baixa frequência, atributos de ponto de frequência padrão, uma cadeia industrial bem estabelecida e excelente adaptabilidade aos diversos serviços das redes de distribuição, tornando-o uma das melhores escolhas para redes de comunicação sem fio dedicadas no setor de energia. Esta solução suporta efetivamente uma cobertura abrangente e transmissão eficiente em toda a rede de distribuição, fornecendo uma base sólida para uma atualização inteligente.

A construção e a aplicação de redes de comunicação sem fio dedicadas no setor de energia não apenas abordam os gargalos de comunicação nas redes de distribuição, aumentam a confiabilidade do fornecimento de energia e a eficiência da operação e manutenção e reduzem os custos de construção e manutenção, mas também apoiam o desenvolvimento coordenado de "geração-rede-carga-armazenamento" (GGLS), promovem a integração de energia renovável e facilitam a dupla transformação da rede elétrica.

Lista de coautores



Gösta Kallner

Presidente Executivo da Aliança 450 MHz
gosta.kallner@450alliance.org



David He Qiang

Secretário Executivo CIGRE SC D2.62
Heqiang@huawei.com

