**Pergunta 2)**

**2. g) Write the output power of each DC-DC converter. Comment and explain the obtained results regarding the output voltage Vdc and the powers in the load and in each converter.**

2c) Po (Conversor 1): 1476W

2f) Po (Conversor 1): 1945W | Po2 (Conversor 2): 2078W

Estes valores coincidem com os valores de potência estabelecidos como objetivo no dimensionamento de cada conversor. A resistência equivalente Req foi calculada de forma a garantir que a potência dissipada após a ligação em paralelo com Rmax corresponde a Po, e o mesmo foi feito para Req2 em relação a Po2.

Após a ligação progressiva das cargas resistivas em t = 0.01 s e t = 0.02 s, observa-se uma pequena queda transitória na tensão da microrede Vdc, rapidamente corrigida pelo sistema de controlo. As tensões de saída Vo e Vo2 mantêm-se reguladas próximas dos 48 V, com desvios inferiores a 1%, confirmando o bom desempenho dos controladores PI implementados em cascata.

Do ponto de vista teórico, estas observações validam que a partilha de carga entre os conversores está corretamente implementada, permitindo que ambos contribuam proporcionalmente para o fornecimento de energia. O controlo de corrente interno garante uma resposta rápida às variações súbitas de carga, enquanto o controlo de tensão externo assegura uma regulação eficaz da tensão comum da microrede, mesmo com múltiplas fontes ativas. Além disso, as perdas no sistema foram consideradas equilibradas, tendo em conta que a resistência das linhas (rLine = 0.04 Ω) e os Rds(on) dos semicondutores foram dimensionados para que as perdas de condução se mantenham próximas das perdas de comutação, o que contribui para a estabilidade global observada.

Por fim, a tensão Vdc comum permanece dentro da margem exigida (48 V ± 1%), sem oscilações significativas, o que confirma a eficácia do sistema de controlo e o correto dimensionamento dos componentes passivos e dos controladores.

**Pergunta 3)**

**3. c) Write the output power of each DC-DC converter. Comment and explain the obtained results regarding the output voltage Vdc and the powers in the load and in each converter. Compare to the situation without primary control.**

Com a implementação do controlo primário por droop, os conversores DC-DC ajustam dinamicamente as suas potências de saída em função da procura da carga e da tensão comum da microrede. Os resultados da simulação indicam:

Po (Conversor 1) = 1529 W | Po2 (Conversor 2) = 2351 W

Estes valores demonstram uma partilha adaptativa e proporcional da potência entre os dois conversores. O conversor 2 fornece uma maior fração da potência total, o que se justifica pela menor resistência virtual atribuída a este conversor no contexto do controlo droop (Rdv2 = 0.16 Ω, enquanto Rdv1 = 0.2743 Ω).

De acordo com a lógica do controlo droop, cada conversor ajusta a sua tensão de saída em função da potência que fornece, provocando uma queda de tensão proporcional ao aumento da sua potência. A constante de droop (ou resistência virtual) determina o grau desta queda: quanto menor for a resistência virtual, menor será a penalização na tensão de saída ao fornecer mais potência. Assim, o conversor com menor Rdv tende a “aceitar” entregar mais potência, pois a sua tensão de saída desce menos por cada watt adicional fornecido, incentivando naturalmente a redistribuição da carga de forma proporcional à sua capacidade.

A tensão da microrede Vdc mantém-se próxima do valor de referência (≈ 48 V), ainda que com uma ligeira queda durante os momentos de aumento de carga (em t = 0.01 s e t = 0.02 s), conforme se espera com esta estratégia. Essa queda é parte integrante do mecanismo de partilha, já que o droop é regido pela expressão:

Vref = Vmax − kdv × (Po − Pomin)

A redução controlada da tensão de saída em função da potência fornecida permite que cada conversor contribua para o fornecimento energético de forma descentralizada e cooperativa, sem necessidade de comunicação entre as unidades.

Comparando com a situação sem controlo primário, observa-se que, embora a partilha já fosse relativamente equilibrada, a ausência de controlo primário não assegura uma divisão ativa e ajustável da potência. Em particular, o controlo sem droop depende exclusivamente da ação dos controladores PI locais, podendo levar a situações menos previsíveis ou sobrecargas caso a carga total aumente.

Por outro lado, com o controlo droop, a partilha é regulada de forma contínua, refletindo as diferenças de configuração entre conversores. Embora o conversor 1 passe a fornecer menos potência em relação ao caso sem droop, a distribuição é agora proporcional à sua capacidade, aliviando o esforço individual e promovendo maior longevidade e segurança dos dispositivos. Além disso, as tensões Vo e Vo2 mantêm-se bem reguladas em ambos os casos, com desvios inferiores a 1%, demonstrando a eficácia dos controladores PI em cascata.

Por fim, concluímos, então, que o controlo primário por droop promove uma partilha mais previsível, segura e escalável da carga entre os conversores, mesmo que em certos casos o total fornecido por uma unidade seja inferior ao do cenário sem controlo. A verdadeira vantagem está na estabilidade a longo prazo, flexibilidade e prevenção de sobrecargas em situações com variabilidade de carga.

**Pergunta 3) – continuação…**

**3. e) Write the output power of each DC-DC converter. Comment and explain the obtained results regarding the output voltage Vdc and the powers in the load and in each converter. Compare to the situation with primary control using power droop.**

Com a implementação do controlo primário baseado em current droop, a simulação apresenta os seguintes valores de potência de saída:

Po (Conversor 1) = 1520 W | Po2 (Conversor 2) = 2365 W

Tal como no controlo por power droop, o objetivo do current droop é promover a partilha de carga de forma descentralizada e proporcional entre os conversores. No entanto, neste caso, a partilha é regulada com base na corrente de saída de cada conversor, e não na potência.

Cada conversor aplica uma resistência virtual (Rdv e Rdv2) em série com a sua tensão de referência, provocando uma redução da tensão de saída proporcional à corrente fornecida. Assim, quanto menor for a resistência virtual atribuída a um conversor, menor será a penalização na sua tensão de saída ao fornecer corrente, permitindo-lhe contribuir com uma maior parcela da carga.

Este comportamento é claramente observado nos resultados, onde o conversor 2, com Rdv2 = 0.16 Ω, fornece significativamente mais potência do que o conversor 1 (Rdv = 0.2743 Ω). A diferença de potências (≈ 845 W) é ligeiramente superior à verificada com controlo por *power droop* (≈ 822 W), o que sugere que o controlo baseado na corrente tem um impacto semelhante, mas ligeiramente mais acentuado na diferenciação de esforço entre as unidades.

A tensão da microrede Vdc mantém-se dentro dos limites aceitáveis, com pequenas variações transitórias no momento da ligação progressiva das cargas (em t = 0.01 s e t = 0.02 s), e rapidamente estabiliza graças à atuação combinada dos controladores PI e do mecanismo de partilha.

Comparando com o controlo por power droop (Po = 1529 W | Po2 = 2351 W), observa-se que o resultado final em termos de partilha de potência é muito semelhante. No entanto, como o current droop atua diretamente sobre a corrente (i.e., sobre o fluxo de carga), pode apresentar uma resposta ligeiramente mais agressiva, o que se reflete na maior diferença de potências obtida.

Ambas as estratégias cumprem o seu propósito: garantir partilha proporcional, evitar sobrecargas e manter a estabilidade da tensão comum. A escolha entre uma ou outra pode depender de fatores como a sensibilidade desejada na resposta, a facilidade de implementação e a robustez esperada em cenários mais dinâmicos.

Por fim, o controlo por *current droop* revela-se eficaz e comparável ao *power droop*, assegurando uma partilha equilibrada e descentralizada da carga entre os conversores. A ligeira vantagem na diferenciação de esforços pode ser útil em sistemas onde se pretende favorecer unidades com maior capacidade ou menor custo operacional.

**Pergunta 4)**

**4. c) Write the output power of each DC-DC converter. Comment and explain the obtained results regarding the output voltage Vdc and the powers in the load and in each converter. Compare to the situation without secondary control.**

Com a introdução do controlo secundário, os resultados da simulação indicam:

Po (Conversor 1) = 1443 W | Po2 (Conversor 2) = 2383 W

Apesar de o conversor 2 continuar a fornecer a maior parcela da potência total, o conversor 1 mostra agora uma contribuição mais ativa, reduzindo o desequilíbrio anteriormente observado. Este resultado é consequência direta da atuação do controlo secundário, que complementa o droop do controlo primário ao ajustar dinamicamente a referência de tensão (Voref) de cada conversor com base numa função tipo Fermi-Dirac, sensível à diferença de potência entre os conversores.

Na prática, este mecanismo compensa os efeitos assimétricos introduzidos pelas resistências das linhas (rLine e rLine2), que afetam negativamente a partilha justa quando apenas o controlo primário está ativo. Estas resistências geram quedas de tensão distintas nos caminhos de cada conversor, o que dificulta uma distribuição equitativa da carga.

A ação do controlo secundário reflete-se em vários aspetos do comportamento da microrede. Em primeiro lugar, a tensão Vdc mantém-se mais estabilizada e próxima do seu valor nominal, mesmo perante variações bruscas da carga, como é visível após o segundo degrau aplicado em t = 0.02 s. Para além disso, os desvios de tensão e corrente nos conversores são mais reduzidos, evidenciando uma atuação mais cooperativa e coordenada entre as unidades. Por fim, o sistema apresenta um tempo de acomodação inferior, recuperando mais rapidamente após perturbações e assegurando uma resposta dinâmica mais robusta.

Em comparação com a situação sem controlo secundário (com controlo por *current droop*), verifica-se uma clara melhoria: nesse caso, o conversor 2 já fornecia mais potência (Po2 ≈ 2365 W) mas o desequilíbrio era menos compensado, e a tensão da microrede apresentava desvios mais notórios.

Resumidamente, o controlo secundário funciona como um nível de supervisão que corrige limitações estruturais do controlo primário. A sua principal função é compensar as assimetrias introduzidas pela rede física, nomeadamente as perdas resistivas nas linhas, permitindo uma regulação mais precisa da tensão Vdc. Para além disso, contribui para uma partilha de potência mais equilibrada entre os conversores, tornando o sistema mais eficiente e escalável. Assim, o controlo secundário revela-se fundamental para garantir a robustez e a justiça na operação de microredes com múltiplos conversores, sobretudo em contextos onde o controlo primário, por si só, não é suficiente para assegurar um funcionamento estável.

**Pergunta 5)**

**5. c) Potência de saída de cada conversor DC-DC. Descrição do comportamento da microrede. Comentário e explicação dos resultados obtidos relativamente à tensão Vdc e às potências nas cargas e em cada conversor. Comparação com a situação sem controlo terciário.**

Com a introdução do controlo terciário, os resultados da simulação indicam:

Po (Conversor 1) = 1556 W | Po2 (Conversor 2) = 2598 W

O controlo terciário é responsável por ajustar a operação global da microrede, utilizando um controlador PI centralizado que gera uma tensão de compensação com base no desvio da tensão da microrede Vdc face ao valor nominal médio, definido como (Vmax+Vmin)/2. Esta tensão adicional é somada à referência dos controladores secundários, com o objetivo de restaurar Vdc ao seu valor ideal, corrigindo os efeitos residuais dos controlos primário e secundário.

Observando os gráficos da simulação, confirma-se que Vdc se aproxima progressivamente da linha de referência, mesmo após as duas perturbações introduzidas (em t ≈ 0.01 s e t ≈ 0.02 s), o que valida a eficácia do controlo terciário em compensar os desvios acumulados. A atuação é lenta mas contínua, como se esperava de um controlador com constante de tempo significativamente superior à dos controlos inferiores (aproximadamente 30 vezes maior, como definido no projeto dos ganhos Kp3 e Ki3).

Relativamente à partilha de potência, observa-se um aumento natural das potências fornecidas por ambos os conversores, especialmente pelo conversor 2. Este aumento não é imposto diretamente pelo controlo terciário, mas resulta do restabelecimento da tensão Vdc a um valor mais elevado, o que leva a um maior fluxo de corrente e, por conseguinte, a um aumento da potência entregue às cargas.

Comparando com o cenário sem controlo terciário (Po = 1443 W e Po2 = 2383 W), o sistema com controlo terciário não só melhora a regulação da tensão da microrede, como também possibilita um funcionamento mais eficiente, ao garantir que os conversores operam em condições mais próximas do ponto ótimo.

Com efeito, podemos concluir que o controlo terciário oferece uma camada final de regulação que garante a estabilidade de longo prazo da microrede. Ao restaurar a tensão Vdc ao seu valor nominal, assegura condições ideais de operação para os conversores e as cargas, melhorando o desempenho global do sistema. A sua ação, embora mais lenta, é fundamental para garantir qualidade de serviço, fiabilidade e coordenação centralizada numa arquitetura com múltiplos níveis de controlo.

**Pergunta 6)**

**6. a) WRITE A SUITABLE LAB TITTLE:**

Análise e Implementação de Estratégias de Controlo Hierárquico em Microredes DC com Conversores DC-DC em Paralelo.

**6. b) Executive Summary (meaningful work done, most important findings) (max 3000 car)**

Neste laboratório foi implementada, testada e analisada uma microrede DC composta por dois conversores DC-DC conectados em paralelo, com o objetivo de estudar a hierarquia de controlo composta por três níveis: primário, secundário e terciário.

O trabalho iniciou-se com a configuração do controlo primário, baseado em estratégias de droop — tanto de potência como de corrente — que permitem uma partilha descentralizada da carga entre os conversores, utilizando apenas medições locais. Observámos que, embora eficazes na regulação inicial, estes métodos são influenciados pelas resistências das linhas (rLine, rLine2), originando assimetrias na distribuição de potência.

Posteriormente, integrámos o controlo secundário, que atua sobre os controladores primários ajustando as referências de tensão com base numa função não linear tipo Fermi-Dirac. Este nível de controlo corrige as distorções causadas pelas perdas resistivas da rede, promovendo uma partilha de potência mais justa e uma melhor regulação da tensão Vdc, mesmo após variações bruscas de carga.

Por fim, implementámos um controlo terciário centralizado, utilizando um controlador PI concebido para operar com uma constante de tempo significativamente mais lenta que os níveis inferiores. Este controlador tem como objetivo restaurar o funcionamento da microrede à tensão nominal de referência, através de uma compensação adicional aplicada às referências dos controladores secundários.

Através das simulações realizadas, verificámos:

- Que a partilha de carga é mais proporcional e robusta com os controlos secundário e terciário;

- Que a tensão da microrede (Vdc) se mantém progressivamente mais próxima do valor nominal à medida que se sobem os níveis da hierarquia de controlo;

- Que os tempos de acomodação e a estabilidade global do sistema melhoram significativamente com a atuação coordenada dos três níveis.

O sistema final revelou-se estável, escalável e eficiente, cumprindo os objetivos propostos de coordenação descentralizada com reforço centralizado. Os resultados práticos validam a importância da abordagem hierárquica no controlo de microredes DC reais, onde fatores como perdas de linha e variações de carga devem ser compensados de forma dinâmica e distribuída.

**Pergunta 6) – continuação…**

**6. c) Discussion of results (namely output voltage variation, range of output powers, ...) (max 5000 car)**

Ao longo deste laboratório, foi possível analisar de forma detalhada o impacto de cada nível de controlo no comportamento da microrede DC, nomeadamente ao nível da variação da tensão de saída Vdc, da partilha de potência entre os conversores e da estabilidade do sistema perante perturbações.

Na fase inicial, com a implementação do controlo primário baseado em droop, verificámos que os conversores conseguiam partilhar a carga de forma descentralizada, utilizando apenas variáveis locais como a potência ou a corrente de saída. Contudo, essa partilha revelou-se sensível às resistências das linhas (rLine e rLine2), que introduziram quedas de tensão assimétricas e originaram uma distribuição de potência desigual, com o conversor 2 a assumir uma fração significativamente maior da carga. Por exemplo, no caso com droop de corrente, a potência de saída do conversor 1 foi de aproximadamente 1520 W, enquanto a do conversor 2 rondou os 2365 W. A tensão Vdc, embora globalmente regulada em torno dos 48 V, apresentava quedas evidentes após degraus de carga, nomeadamente em t = 0.01 s e t = 0.02 s, com uma recuperação lenta e limitada pela ausência de mecanismos de compensação mais avançados.

Com a introdução do controlo secundário, foi possível compensar os efeitos das resistências das linhas através da aplicação de uma função não linear tipo Fermi-Dirac que ajusta dinamicamente a referência de tensão dos controladores primários. Esta abordagem permitiu reduzir os desequilíbrios na partilha de potência e melhorar a resposta do sistema. Verificámos que o conversor 1 passou a contribuir de forma mais ativa, com uma potência de saída na ordem dos 1443 W, enquanto o conversor 2 manteve cerca de 2383 W. Para além disso, observámos uma estabilização mais eficaz da tensão Vdc após as perturbações, bem como uma redução nos tempos de acomodação e nas oscilações transitórias.

A implementação do controlo terciário trouxe uma camada adicional de regulação, desta vez centralizada, com um controlador PI projetado para atuar sobre o desvio da tensão Vdc face ao valor nominal da microrede. Este controlador gerou uma compensação adicional somada à referência dos controladores secundários, permitindo corrigir os desvios residuais e garantir uma operação mais próxima do ideal. Com esta estratégia, a tensão Vdc apresentou menor erro permanente e maior estabilidade a longo prazo. Em consequência, ambos os conversores passaram a fornecer mais potência, com o conversor 1 a atingir cerca de 1556 W e o conversor 2 a aproximar-se dos 2598 W. Este aumento de potência não resulta de uma imposição direta do controlo terciário, mas sim da melhoria global das condições operacionais da microrede, possibilitada pela regulação eficaz da tensão.

Em síntese, os resultados demonstram que cada nível de controlo contribui de forma complementar para o desempenho do sistema. O controlo primário estabelece uma partilha descentralizada, mas limitada pelas assimetrias físicas da rede. O controlo secundário atua como correção distribuída, compensando essas limitações e promovendo uma partilha mais justa. Finalmente, o controlo terciário assegura a recuperação da tensão nominal e a robustez global da microrede. A evolução da tensão Vdc, a progressiva redução das assimetrias de potência e a melhoria da resposta dinâmica validam a eficácia desta abordagem hierárquica, confirmando a sua aplicabilidade em contextos reais onde a estabilidade, eficiência e escalabilidade são fundamentais.

**Pergunta 6) – continuação…**

**6. d) Conclusions and recommendations (main conclusions and suggestions/recommendations) (max 5000 car)**

A realização deste laboratório permitiu compreender, implementar e avaliar a eficácia de uma arquitetura de controlo hierárquico numa microrede DC com conversores DC-DC operando em paralelo. A estrutura testada incluiu três níveis de controlo: primário, secundário e terciário, cada um com funções e objetivos específicos, mas interligados para garantir a operação estável, eficiente e justa da microrede.

Conclui-se que o controlo primário, baseado em droop (de potência ou corrente), é essencial para viabilizar uma partilha descentralizada da carga entre os conversores, recorrendo exclusivamente a variáveis locais. No entanto, este tipo de controlo é sensível a assimetrias físicas do sistema, como as perdas resistivas nas linhas DC. Estas assimetrias conduzem a uma partilha desigual da potência, como observado nas simulações iniciais, onde o conversor 2 assumia uma fração desproporcional da carga. A tensão da microrede Vdc, embora regulada de forma geral, apresentava desvios significativos após perturbações súbitas, limitando a qualidade do fornecimento.

A introdução do controlo secundário revelou-se fundamental para corrigir essas limitações. Ao ajustar dinamicamente a referência de tensão de cada conversor com base numa função tipo Fermi-Dirac, este nível de controlo permitiu compensar os efeitos das resistências das linhas, equilibrar a partilha de potência e melhorar a estabilidade global da tensão Vdc. Observou-se uma melhoria clara na resposta do sistema após variações de carga, com tempos de acomodação reduzidos e menor desequilíbrio entre os conversores.

O controlo terciário, de natureza centralizada, acrescentou uma camada final de supervisão, ajustando a tensão da microrede para o seu valor nominal através de um controlador PI. Este mecanismo permitiu restaurar Vdc com maior precisão e garantir um desempenho mais robusto e previsível a longo prazo. Os resultados mostram que a atuação do controlo terciário, embora mais lenta, proporciona uma operação mais eficiente dos conversores, com aumento da potência fornecida sem comprometer a estabilidade.

Em termos globais, a arquitetura hierárquica mostrou-se eficaz: o controlo primário assegura resposta rápida e descentralizada; o controlo secundário corrige desequilíbrios estruturais; e o controlo terciário garante estabilidade de longo prazo e aderência à tensão de referência. Esta coordenação entre diferentes escalas temporais e níveis de decisão confirma-se como a abordagem mais adequada para microredes modernas, onde múltiplos conversores operam em conjunto sob condições variáveis.

Com base nos resultados obtidos, acreditamos que seria benéfico que sistemas reais adotem, sempre que possível, uma abordagem hierárquica semelhante. A utilização combinada de controlo primário e secundário é fundamental em microredes com variabilidade física significativa ou requisitos de robustez operacional. O controlo terciário, por sua vez, é particularmente recomendado em contextos onde se exija uma elevada qualidade de serviço e estabilidade a longo prazo. Para garantir o sucesso desta abordagem, é igualmente importante considerar, na fase de projeto, a capacidade dos dispositivos de controlo e comunicação para suportar a complexidade acrescida dos níveis superiores.

Por fim, este laboratório demonstrou que uma estratégia de controlo hierárquico bem dimensionada é essencial para assegurar uma operação eficiente, escalável e resiliente de microredes DC com múltiplos conversores, sendo uma solução altamente recomendável para aplicações reais que exijam desempenho técnico fiável em ambientes com dinâmicas variáveis e limitações físicas.