

PLANTAS EÓLICAS: MODELAGEM PARA ESTUDOS DE CURTO-CIRCUITO E CRITÉRIOS DE AJUSTES DAS PROTEÇÕES

Eduardo Cesar Senger (*)
ESCOLA POLITÉCNICA DA USP

Francisco Antônio Reis Filho
Farfilho Consultoria Comércio e Representações LTDA

RESUMO

O artigo apresenta e analisa os diagramas sequenciais necessários para representar os diversos tipos de aerogeradores, inclusive os tipo III e IV, para os quais o comportamento sobre falta é ditado pelos controles dos conversores AC-AC. São discutidos os diagramas aplicáveis tanto ao período transitório quanto ao regime permanente das faltas simétricas (trifásicas) e assimétricas (fase-terra e dupla-fase). Os diagramas apresentados baseiam-se somente em dados facilmente disponíveis na etapa de projeto da planta eólica e fornecem resultados plenamente satisfatórios para estimação das contribuições das correntes de curto-circuito.

Como uma segunda abordagem ao tema, os resultados acima são aplicados na análise do sistema de proteção de uma planta eólica típica, sendo dada ênfase aos seguintes aspectos:

- A contribuição efetiva dos aerogeradores de um dado circuito coletor de média tensão para os diversos tipos de defeitos ocorrendo em um circuito coletor vizinho. A partir desse dado, é necessário certificar que a proteção de sobrecorrente utilizada nesses circuitos opera com segurança para todas as faltas ao longo do circuito protegido e que não atua desnecessariamente para faltas que ocorrem em um circuito coletor vizinho.
- Analisar as alternativas para uma proteção eficiente contra faltas na barra de média tensão da subestação.
- Verificar se haverá a contribuição necessária dos aerogeradores para defeitos na linha de transmissão de alta tensão que permita às unidades de distância (21/21N) detectar com segurança faltas não sólidas próximas do terminal remoto, ou se haverá a necessidade a complementação dessas unidades pela função diferencial de linha (87L).

PALAVRAS-CHAVE

Parques Eólicos, Modelagem de Aerogeradores, Cálculo de Curto-circuito, Proteção de Parques Eólicos

1.0 - INTRODUÇÃO

O número e a capacidade instalada dos parques eólicos no Brasil têm aumentado de forma significativa nos últimos anos. Apesar da crescente importância desse tipo de instalação para o setor elétrico brasileiro, elaborar estudos elétricos de plantas eólicas, particularmente aqueles relacionados com o projeto do sistema de proteção, continua sendo um grande desafio para as empresas envolvidas nesse importante tópico.

A primeira dificuldade decorre do fato de que não existem modelos, baseados nos diagramas sequenciais utilizados no cálculo das correntes de curto-circuito, que sejam aplicáveis a todos os tipos de aerogeradores utilizados e amplamente aceitos e conhecidos pelos profissionais do setor. Outra dificuldade reside no fato dos projetos mais modernos de aerogeradores utilizarem malhas de controle proprietárias que afetam significativamente a contribuição do equipamento para as correntes de curto-circuito. Os fabricantes tratam as informações referentes a esses controles como segredo industrial e não divulgam dados ou detalhes sobre seu funcionamento. Nesse cenário, ainda não existem modelos bem estabelecidos ou um procedimento padrão para o cálculo das correntes de curto-circuito e conseqüentemente para os ajustes das proteções da planta eólica. Esses fatos têm impacto direto nos critérios de ajustes não só das proteções no setor de média tensão, mas também das proteções da concessionária no ponto de conexão. Esses pontos são abordados e discutidos nos itens a seguir.

2.0 - PARQUES EÓLICOS E TIPOS DE AEROGERADORES UTILIZADOS

A Figura 1 ilustra um parque eólico na forma típica em que é implantado atualmente. Os aerogeradores comumente utilizados nessas instalações possuem potência nominal entre 1 e 3 MVA e tensão nominal em torno de 600 V,

(*) Eduardo Cesar Senger: senger@pea.usp.br

embora já existam equipamentos operando em média tensão e com potência bastante superior. A cada aerogerador é associado um transformador elevador que eleva a tensão para 13,8 ou 34,5 kV. A conexão típica dos enrolamentos desses trafo é estrela aterrada (baixa tensão)/delta (média). O enrolamentos do estator e do rotor do gerador, normalmente, são conectados na ligação estrela não aterrada. As dezenas ou mesmo centenas de aerogeradores que integram um parque de grande porte são interconectados através de vários circuitos coletores, radiais, de média tensão, até o transformador da subestação responsável pela conexão da planta com o sistema interligado. Como mostrado na Figura 1, uma conexão típica para esse transformador é estrela aterrada (alta tensão) e delta (média tensão). Como fonte de terra para a rede de média tensão da planta utiliza-se um trafo de aterramento em conexão zig-zag, ligado na barra de 34,5 kV. Essa solução fornece uma fonte de terra para a planta e para o SIN e também garante uma isolamento de sequência zero entre esses dois sistema.

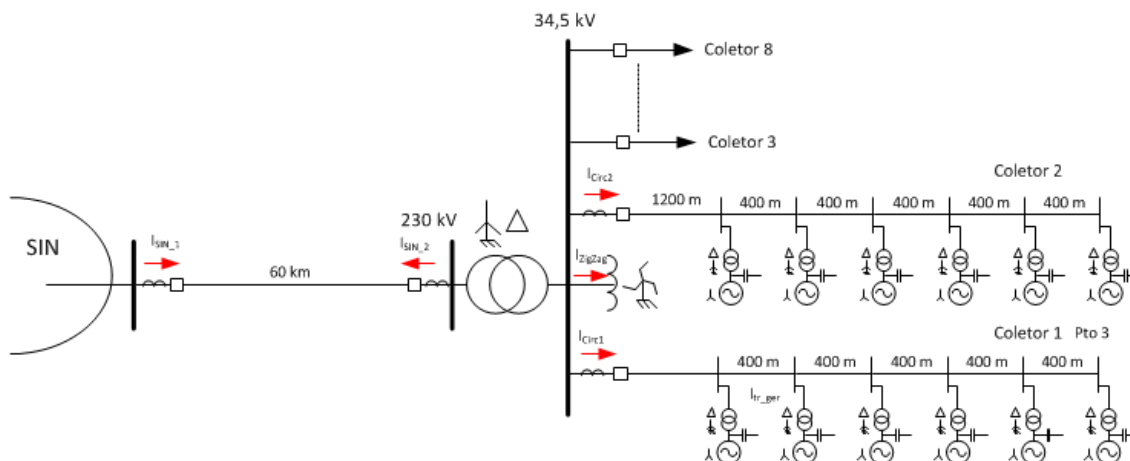


FIGURA 1- Estrutura de um parque eólico típico

Os aerogeradores utilizados nesse tipo de instalação, como ilustrado na Figura 2, podem ser agrupados em quatro tipos:

- **Tipo I:** Consiste em um Gerador de indução de Gaiola de Esquilo (GIGE) que opera em velocidade fixa, levemente acima da frequência da rede. Para compatibilizar a baixa frequência de rotação do eixo das pás (20 a 150 rpm) com a rotação exigida para o rotor do gerador (1200 a 1800 rpm), utiliza-se uma caixa de engrenagens (CE) multiplicadora. A partida da unidade é realizada através de um *soft-start*, o qual é curto-circuitado por um contator de by-pass durante a operação normal. Para compensar o fraco suporte reativo fornecido à rede por este tipo de aerogerador, como mostrado na Figura 2, na saída do enrolamento do estator encontram-se instalados vários estágios de banco de capacitores para correção do fator de potência, os quais são chaveados on/off de acordo com a potência gerada.
- **Tipo II:** Difere do anterior por utilizar um Gerador de Indução de Rotor Bobinado (GIRB), sendo que neste enrolamento é conectado, através de escovas e anéis, um grupo de resistores variáveis. O valor efetivo desses resistores é ajustado pelo controle de carga do aerogerador. Esse tipo de aerogerador opera com velocidade supersíncrona na faixa de 1.0 a 1.1 pu. Como ocorre com o tipo I, possui partida através de *soft-start* e capacitores chaveáveis para controle do fator de potência.
- **Tipo III:** Este tipo, também denominado Gerador de Indução Duplamente Alimentado (GIDA), faz uso dos conversores eletrônicos de potência para viabilizar o controle completo das potência ativa e reativa fornecidas à rede. Semelhante ao tipo II, também utiliza um gerador de indução de rotor bobinado, sendo que os enrolamento do rotor são conectados em paralelo com os enrolamentos do estator através de um conversor bidirecional de potência, AC/AC, como mostrado na Figura 2. Esse conversor é projetado para fornecer uma potência de até 30% da potência total do aerogerador e permite uma faixa de velocidade de operação muito mais ampla que os tipos anteriores, normalmente, entre 0,7 a 1,3 pu. Isso torna o aerogerador mais eficiente na extração da potência do vento e na redução do stress mecânico no conjunto turbina-gerador. Do lado do rotor, através do ajuste da amplitude, fase e frequência da tensão aplicada nesses enrolamentos, o sistema de controle do conversor regula, de forma desacoplada, usando técnicas de controle vetorial, os fluxos de potência ativa e reativa. Devido à diferença de velocidade entre os eixos das pás e do gerador, a caixa de engrenagens multiplicadora ainda é necessária. Durante a ocorrência de curto-circuitos próximos ao gerador, elevadas correntes podem ser induzidas nos enrolamentos do rotor. Isso leva à necessidade da utilização de um sistema de proteção do conversor lado rotor, conhecido como *crowbar*. Quando atuado, o *crowbar* desabilita o conversor e curto-circuita os enrolamentos do rotor através de um resistor adequado, levando ao amortecimento das correntes induzidas nesse enrolamento. As diferentes formas de controle do conversor e do *crowbar* influenciam fortemente o comportamento dinâmico das correntes fornecidas pelo gerador durante a falta.
- **Tipo IV:** Nesta solução, os enrolamentos do estator são conectados à rede através de um conversor AC-AC, bidirecional, projetado, neste caso, para 100 % da potência nominal do aerogerador. Diversos tipos de

geradores podem ser utilizados com esta solução: gerador síncrono (GS) de rotor bobinado; gerador síncrono de ímã permanente; gerador de indução (GI). O arranjo mecânico também permite variações, como por exemplo, a eliminação da caixa de engrenagens quando utilizado um gerador síncrono multipolos, de ímã permanente. Devido ao conversor, a velocidade de rotação é completamente desacoplada da frequência da rede, permitindo a operação do aerogerador em uma ampla faixa de velocidades e a minimização das oscilações mecânicas e elétricas no sistema. As mesmas técnicas de controle vetorial, utilizadas no Tipo III, podem ser implementadas, possibilitando o controle desacoplado das potências ativa e reativa injetadas na rede. Como as malhas de controle do conversor permanecem sempre ativas, mesmo durante a ocorrência de faltas no sistema, a dinâmica das correntes será diretamente dependente dos algoritmos de controle utilizados nessas malhas.

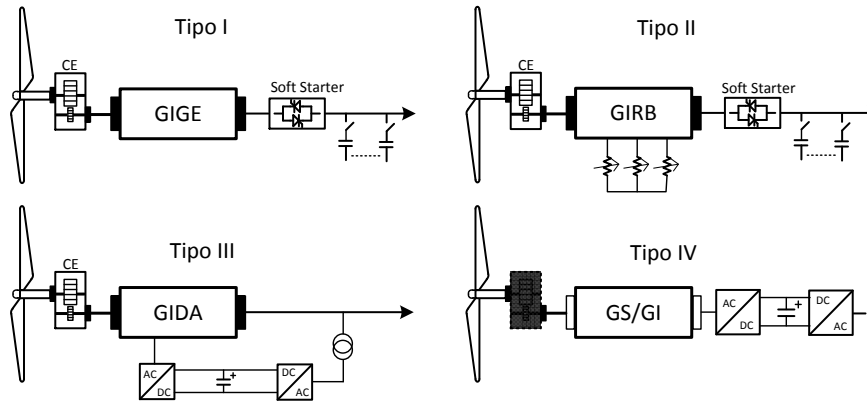


FIGURA 2 – Tipos de Aerogeradores modelados

3.0 - DIAGRAMAS SEQUENCIAIS DOS AEROGERADORES

Neste item são apresentados e discutidos os resultados de diversos trabalhos de pesquisa publicados na literatura internacional que estudaram a modelagem dos geradores utilizados em plantas eólicas visando a construção de diagramas sequenciais aplicáveis ao cálculo das correntes de curto-circuito.

3.1 Diagramas sequenciais para aerogeradores Tipos I e II

A dinâmica das correntes durante um curto-circuito trifásico em aerogeradores Tipo I é representada com a necessária precisão através de um modelo “tensão atrás da reatância transitória” [1], [2], ilustrado na Figura 3 (diagrama de sequência positiva). A construção desse modelo baseia-se no fato de que os enrolamentos rotóricos dos geradores de indução de gaiola de esquilo encontram-se curto-circuitados e, dessa forma, não é possível ao fluxo magnético concatenado com esse enrolamento variar instantaneamente. Este circuito permanece válido por um breve período de tempo após o início do curto-circuito, conhecido como período transitório, antes que o fluxo comece a variar devido à resistência não nula existente nos enrolamentos. A tensão interna indicada nesse modelo pode ser calculada a partir das tensões e correntes presentes nos terminais do gerador na pré-falta. Para faltas assimétricas deve-se considerar também o diagrama de sequência negativa, que durante o regime transitório é análogo ao de sequência positiva, porém curto-circuitando-se a tensão interna (V'). Dado que, para todos os tipos de aerogeradores considerados neste trabalho, os enrolamentos (estator e rotor) são admitidos ligados em estrela não aterrada, o diagrama de sequência zero do gerador será sempre aberto, podendo ser desprezado. A Figura 3 também mostra os diagramas sequenciais do gerador válidos para cálculo das correntes de falta em regime permanente, isto é, após o término do período transitório. A capacitância (C_{cpf}) do capacitor de correção do fator de potência também foi incluído nos diagramas. Os seguintes parâmetros elétricos do gerador de indução encontram-se presente nesses seis diagramas sequenciais:

- | | |
|--|--|
| R_r - resistência dos enrolamentos do rotor; | R_s - resistência dos enrolamentos do estator; |
| X_{lr} - reatância de dispersão do rotor | X_{ls} - reatância de dispersão do estator; |
| X_M - reatância mútua (ou magnetizante) | ω_s e ω_r - velocidades do campo no estator e do rotor |

As reatâncias e constantes de tempo transitórias do estator e do rotor, bem como o escorregamento do rotor são fornecidos, respectivamente, pelas equações [1] a [5] a seguir.

$$X'_s = X_{ls} + \frac{X_{lr} \cdot X_M}{X_{lr} + X_M} = \omega_0 \cdot L'_s \quad (1)$$

$$X'_r = X_{lr} + \frac{X_{ls} \cdot X_M}{X_{ls} + X_M} = \omega_0 \cdot L'_r \quad (2)$$

$$T'_s = \frac{L'_s}{R_s} \quad (3)$$

$$T'_r = \frac{L'_r}{R_r} \quad (4)$$

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (5)$$

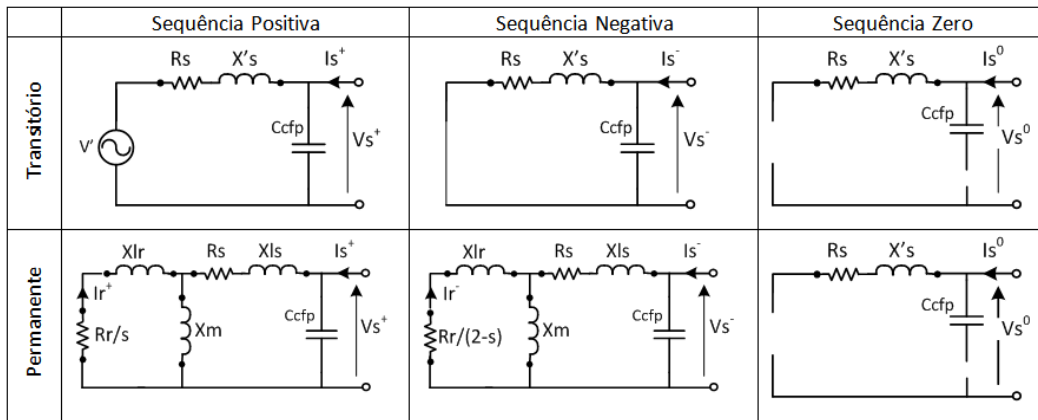


FIGURA 3 - Diagramas sequenciais para aerogeradores Tipos I e II em regimes Transitório e Permanente

Utilizando os digramas sequenciais para o período transitório, mostrados na Figura 3, convenientemente associados de acordo com o tipo de falta estudada (simétrica ou assimétrica), é possível calcular o fasor da corrente (\dot{I}_{tr}) válido para o instante imediatamente após o início da falta (instante t_{0+}). Esse fasor é gerado pela tensão atrás da reatância transitória do estator, proporcional ao fluxo magnético interno da máquina, o qual decai exponencialmente, com a constante de tempo transitória do rotor (T_r). Já os diagramas sequenciais de regime permanente fornecem o fasor da corrente de regime permanente (\dot{I}_{rp}), válido após o fim do período transitório. O fasor correspondente às correntes em qualquer uma das fases do trifásico poderá ser estimado, ao longo do tempo, a partir dessas duas componentes (\dot{I}_{tr} e \dot{I}_{rp}) pela expressão [6] a seguir.

$$\dot{I}_{AC}(t) = (\dot{I}_{tr} - \dot{I}_{rp})e^{-t/T_r} + \dot{I}_{rp} \quad (6)$$

No gerador Tipo I, dependendo do valor da reatância transitória do estator, uma falta trifásica nos terminais da máquina pode produzir correntes com o primeiro pico bem acima da nominal, da ordem de 6 a 8 vezes a corrente nominal.

No caso do gerador Tipo II, a diferença reside na utilização de um gerador de indução com rotor bobinado, nos terminais do qual é conectado um conjunto de resistores (R_{ext}). O valor dessa resistência externa pode ser da ordem de 10 vezes a resistência interna dos enrolamentos do rotor. Em paralelo com os resistores externos é utilizado um retificador trifásico em cuja saída é ligado um IGBT. Quando o IGBT conduz, os resistores são curto-circuitados. A modulação do *duty cycle* do IGBT produz uma resistência externa efetiva variável, cujo valor é controlado pelo circuito PWM que envia pulsos para o IGBT. Esse loop de controle é utilizado para controlar a potência gerada pelo aerogerador através da variação das correntes no rotor da máquina. Em termos de cálculo das correntes de curto-circuito, o comportamento do gerador Tipo II é semelhante ao do Tipo I, exceto pelo valor da resistência do rotor, que agora assume o valor $R_r' = R_r + R_{ext_efet}$. Isso irá influir principalmente em uma diminuição significativa da constante de tempo do rotor (constante de decaimento da corrente de curto). Os mesmos diagramas sequenciais apresentados na Figura 3 aplicam-se ao aerogerador Tipo II.

3.2 Diagramas sequenciais para geradores Tipo III

No desenvolvimento de modelos sequenciais para geradores Tipo III dois pontos importantes devem ser observados: a) O controle do conversor influencia fortemente o comportamento do gerador durante a ocorrência de curtos-circuitos e, portanto, deve ser cuidadosamente considerado na construção dos modelos; b) a atuação da proteção *crowbar* altera a topologia do circuito elétrico do gerador e, dessa forma, a dinâmica das correntes durante a falta. A referência [4] fez uma análise minuciosa do gerador Tipo III e de seus controles e desenvolveu dois conjuntos de circuitos sequenciais. O primeiro aplica-se ao cálculo das correntes de falta para as situações em que não há atuação da proteção *crowbar*, e o conversor do lado rotor mantém o controle das correntes injetadas no rotor. O outro se aplica ao caso em que o *crowbar* é ativado imediatamente após a falta e o controle das correntes no rotor é perdido. Os diagramas de sequência positiva e negativa para o primeiro caso (*crowbar* não atuado) são mostrados no topo da Figura 4. Os parâmetros X_{gf} e C_f , mostrados nessa figura, correspondem à reatância e capacitância do filtro *anti-ripple* do conversor lado grid. Sem atuação do *crowbar*, os conversores do lado rotor e grid comportam-se como geradores de correntes de sequência positiva. As magnitudes dessas duas correntes são calculadas a partir da tensão (V_s), e das potências ativa (P_T) e reativa (Q_T) nos terminais do gerador na pré-falta, seguindo-se os passos indicados a seguir:

- A partir da potência ativa total nos terminais determina-se as parcelas de potências fornecidas pelo enrolamento estator (P_s) e pelo conversor lado grid (P_g). Para tanto, pode-se utilizar curvas fornecidas pelo fabricante, ou na ausência destas, as equações aproximadas [7] e [8].

$$P_s = P_T (1 - s) \quad (7)$$

$$P_g = -P_T \cdot s \quad (8)$$

- b) De forma análoga, a proporção de divisão da potência reativa também deve ser conhecida e utilizada para determinar Q_s e Q_g .
- c) A partir de P_g , Q_g , P_s , Q_s e V_s determinam-se I_s e a corrente do gerador de corrente I_g . A partir de I_s e V_s determina-se a corrente do segundo gerador I_r .

Para o circuito de sequência negativa, os ramos correspondentes aos conversores lado rotor e lado grid são representados como circuitos abertos, dado que considera-se que os controles desses conversores somente permitem o fluxo de corrente de sequência positiva. Dessa forma, o único caminho para circulação das correntes de sequência negativa no gerador Tipo III, sem atuação do *crowbar*, é através da reatância magnetizante e da capacitância do filtro.

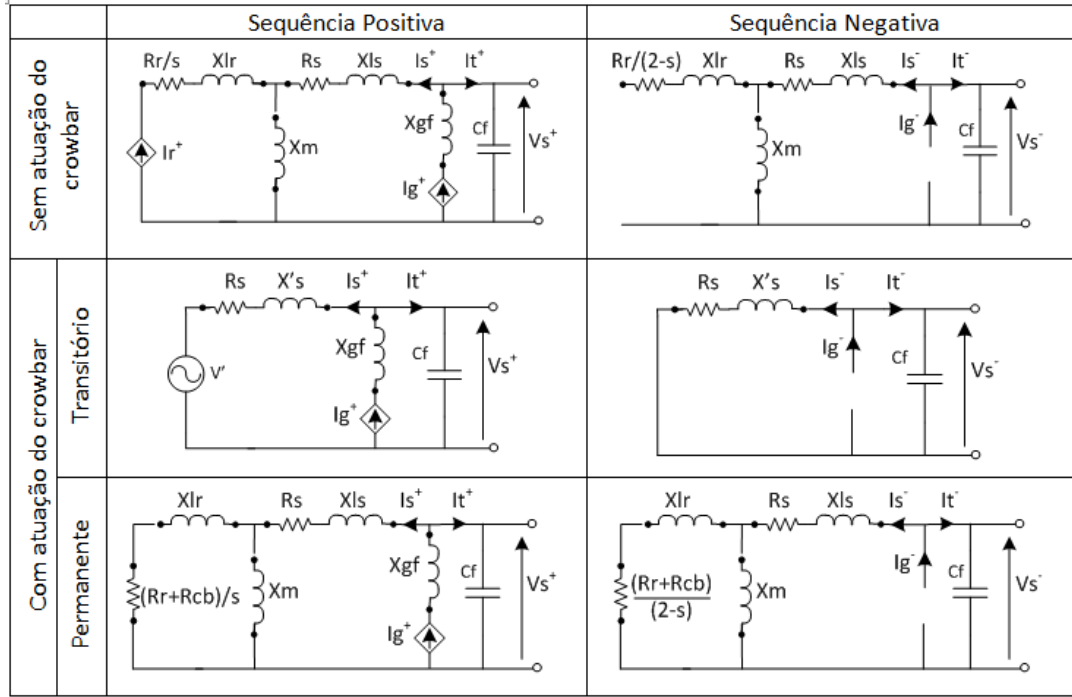


FIGURA 4 - Diagramas sequenciais para o aerogerador Tipo III

No caso de atuação do *crowbar*, o gerador Tipo III, comporta-se de forma próxima ao gerador Tipo II, dado que o conversor lado rotor é desabilitado e os enrolamentos do rotor são conectados a um resistor externo (R_{cb}). O conversor do lado grid, no entanto, continua mantendo controle da tensão do link DC e das correntes do lado grid. Neste caso, de forma análoga aos geradores Tipo I e II, tem-se dois conjuntos de diagramas sequenciais: um para o período transitório e outro para o regime permanente. Esses circuitos são próximos aos dos Tipos I e II, com exceção do ramo com o gerador de corrente correspondente ao conversor lado grid cujo controle permaneceu ativo. A fonte de tensão V' é calculada a mesma forma que o realizado para os Tipos I e II.

3.3 Diagramas sequenciais para geradores Tipo IV

Neste tipo de aerogerador, a conexão do gerador com a rede é realizada somente através do conversor AC/AC. Durante uma falta na rede, a dinâmica das correntes fornecidas pelo gerador será ditada quase que exclusivamente pelos algoritmos de controle do conversor lado grid. Durante a operação normal do sistema elétrico o controle desse conversor, normalmente, controla a tensão do link DC do conversor e a potência reativa fornecida à rede. Quando da ocorrência de uma falta, o controle detecta essa situação a partir do monitoramento da subtenção produzida pela falta nos terminais do aerogerador ($V_t < V_{g,min}$) e passa a operar em um modo de limitação da corrente, no qual o conversor lado fonte injeta na rede uma corrente constituída somente por sequência positiva e com magnitude pré-definida. O valor de pico dessa corrente (I_{gmax}) é definida pelo fabricante de forma a não danificar os IGBT do conversor e, normalmente, situa-se na faixa de 1,1 a 1,4 pu da corrente nominal. A referência [4] fez uma análise detalhada dos controles do conversor lado grid, de sua influência na dinâmica das correntes de curto-circuito e propôs os diagramas sequenciais mostrados na Figura 5. O diagrama de sequência positiva para este tipo de gerador é construído considerando-se:

- a) A corrente de pré-falta fornecida pelo conversor lado grid pode ser calculada pela expressão [9]

$$\dot{I}_g^0 = I_{g,d}^0 + jI_{g,q}^0 = \left[(P_s + jQ_s) / \dot{V}_s \right]^* \quad (9)$$

- b) Quando ocorre a falta, o controle do conversor continua fornecendo a mesma componente da corrente de eixo direto e altera a componente do eixo de quadratura de forma que a corrente total atinja o valor de pico I_{gmax} . Essa situação pode ser descrita pela equação [10]. O chaveamento do controle para o modo de limitação de corrente demora em torno de 1 ciclo [4] e, para efeito de simplificação, será considerado instantâneo.

$$\dot{I}_g^1 = I_{g,d}^0 - j\sqrt{\left(I_{g,max}/\sqrt{2}\right)^2 - \left(I_{g,d}^0\right)^2} \quad (10)$$

- c) Admite-se que o controle permite somente o fluxo de correntes de sequência positiva no conversor, o que reflete em um circuito de sequência negativa aberto, como mostrado na Figura 5. O único caminho para circulação de sequência negativa no gerador tipo IV é através do capacitor do filtro *anti-ripple*.

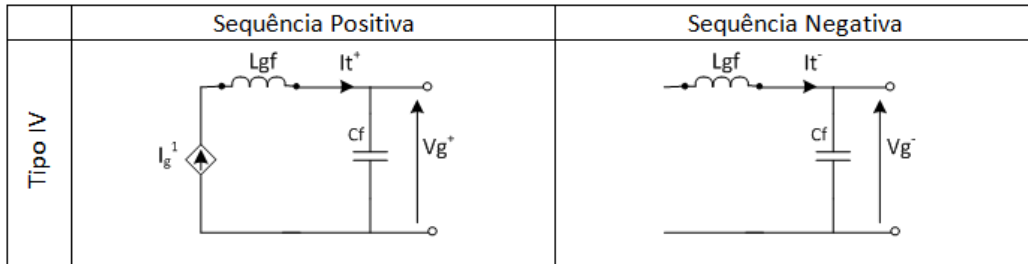


FIGURA 5- Diagramas sequenciais para geradores Tipo IV

4.0 - CÁLCULO DAS CORRENTES DE FALTA NO PARQUE EÓLICO

Utilizando-se os diagramas sequenciais propostos para os geradores, o parque eólico exemplo mostrado na Figura 1 foi modelado para efeito de cálculo das correntes de curto-circuito. Foram construídos cinco circuitos distintos, cada um considerando uma alternativa de aerogerador: a) Tipo I; b) Tipo II; c) Tipo III sem atuação do *crowbar*; d) Tipo III com atuação do *crowbar*; e) Tipo IV. Cada um desses circuitos é constituído pelos diagramas de sequência positiva, negativa e zero da rede da Figura 1, associados de acordo com a teoria de componentes simétricas, no ponto de falta, para representar um particular tipo de falta. Para efeito de simplificar o trabalho de construção desses circuitos sequenciais, considerou-se que a rede coletora de média tensão do parque é constituída por oito alimentadores coletores iguais, cada conectado a seis aerogeradores de 2 MW e tensão nominal de 600 V. Dessa forma, o parque é constituído por 48 geradores, com potência total de 96 MW.

Foram calculadas faltas trifásicas, dupla-fase e fase-terra (sólidas e com impedância de falta), ocorrendo na linha de alta tensão, na barra de média tensão da SE e ao longo do circuito coletor 1. Em todas essas faltas considerou-se os geradores operando na pré-falta com 90% de sua potência nominal (1,8 MW) e fator de potência unitário. Os fasores das correntes e tensões verificadas nos diagramas sequenciais foram calculados com a utilização do toolbox *SimPowerSystems* disponível no MatLab.

Para os geradores Tipo I, II e III com atuação do *crowbar* foram calculados os fasores das correntes do período transitório e do regime permanente. A variação desses fasores ao longo do tempo foi estimada com a utilização da equação [6]. A constante de tempo transitória do rotor utilizada nessa equação, calculada incluindo a indutância de curto-circuito do transformador elevador do gerador, é mostrada na Tabela [1] para os diversos tipos de gerador em que ela é de interesse. Pode-se observar que, para os geradores em que existe uma resistência externa inserida no circuito do rotor (Tipos II e III com *crowbar* atuado), esse constante de tempo é muito pequena, o que implica no rápido amortecimento da componente transitória das correntes.

TABELA 1- Constante de tempo transitória do rotor (em ms)

Tipo I	Tipo II	Tipo III (<i>crowbar</i> atuado)
55	5	3

A título de ilustração dos resultados fornecidos pela metodologia apresentada, na Figura 6 é mostrada a contribuição, ao longo do tempo, calculada com a utilização da expressão [6], dos seis geradores do coletor 2 para duas faltas (trifásica e dupla-fase) ocorrendo na barra de 34,5 kV da Subestação. Vale observar que a corrente de carga nominal desses seis geradores é de cerca de 200 A nessa tensão. Já a Tabela [2] mostra os fasores, dos períodos transitório e de regime permanente, da corrente da fase A na saída dos coletores 1 e 2 durante uma falta fase-terra (AN) no início do coletor 1 (a corrente no coletor 2 é a contribuição de um coletor para a falta ocorrendo no coletor vizinho; já a corrente no coletor 1 representa a contribuição total, do SIN e de todos os coletores vizinhos para o ponto de falta).

O modelamento apresentado acima foi utilizado no projeto do sistema de proteção do parque exemplo mostrado na Figura 1. Com base nessa experiência, no item a seguir são apresentados alguns comentários e observações sobre a filosofia e os critérios de ajuste das proteções utilizadas nesse tipo de instalação.

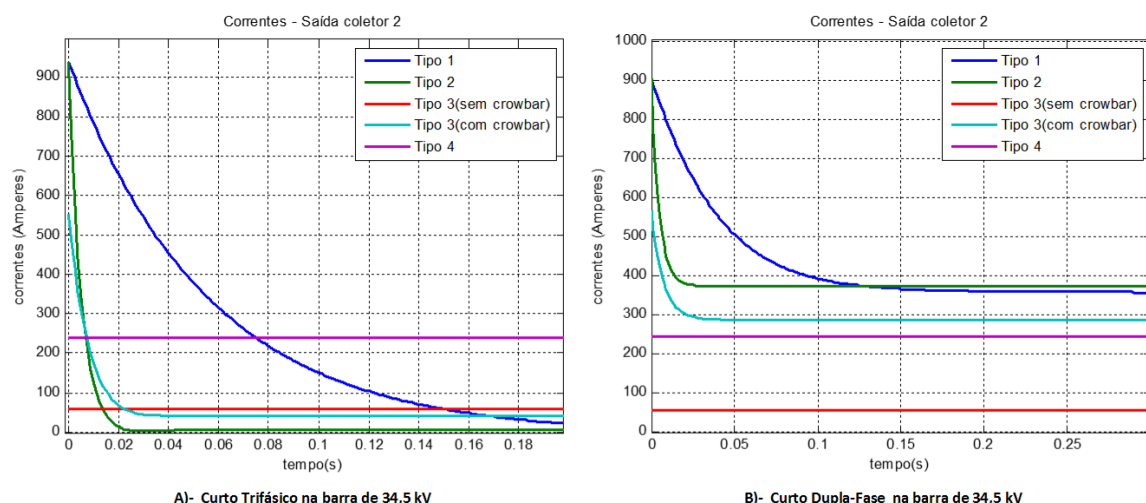


FIGURA 6 – Contribuição dos aerogerador do coletor 2 para faltas trifásica e dupla-fase na barra de 34,5 kV

TABELA 2 - Correntes (A) na fase A dos coletores 1 e 2 para falta fase-terra na saída do coletor 1

Tipo aerogerador	Coletor 1		Coletor 2	
	Transitório	Permanente	Transitório	Permanente
I	10732 /-92°	6747 /-91°	445 /110°	276 /-128°
II	10732 /-92°	9101 /-94°	445 /110°	192 /125°
III sem crowbar	-	8339 /-87°	-	177 /168°
III com crowbar	9799 /-92°	8420 /-92°	314 /121°	150 /161°
IV	-	9617 /-87°	-	241 /90°

5.0 - SISTEMAS DE PROTEÇÃO DO PARQUE EÓLICO

5.1 Proteção de distância da Linha de Transmissão

Para esta função deve-se garantir sua efetiva aplicabilidade na proteção da LT de 230 kV, particularmente para o terminal junto ao parque (terminal local), verificando se ocorre a correta partida das unidades 21P e 21N, em função da contribuição das correntes dos aerogeradores, para todos os tipos de faltas ao longo da LT. Com esse enfoque, foram calculados os fasores das tensões e correntes no terminal da SGE para defeitos trifásicos, dupla-fase e fase-terra franco e com impedância. Na condição operativa simulada e com carregamento dos geradores em 90% da potência nominal com fator de potência unitário, obtém-se uma impedância de carga de 612 Ohms em valores primários. Considerou-se então a utilização do relé D-60 da GE, com característica MHO para a função 21 e característica Quadrilateral para a 21N, com alcance de Segunda Zona (150 % da Zona 1) e uso dos esquemas de teleproteção tipo POTT (*Permissive Overreaching Transfer Trip*) para dar uma flexibilidade maior aos esquemas de proteção. O alcance resistivo da característica quadrilateral foi fixado em 50 Ohms. As impedâncias medidas para as diversas condições foram obtidas e visualizadas com o software do fabricante como mostrado na Figura 7.

Dado que o terminal local (parque eólico) comporta-se como uma fonte fraca (o controle dos geradores eólicos, particularmente dos tipos III e IV, limita a corrente de falta), analisou-se a possibilidade da função 21N, no ajuste descrito acima, não apresentar o alcance resistivo necessário para detectar faltas fase-terra, não sólidas, ocorrendo próximas do terminal remoto. Os resultados da simulação, no entanto, mostraram que faltas AN com resistência de até 13 Ohms, ocorrendo na barra remota, eram detectadas pela segunda zona da função 21N, para todos os tipos de geradores. A Figura 7 mostra faltas trifásicas e fase-terra com impedância de 13 Ohms, ocorrendo na barra remota da rede exemplo com geradores Tipo III (figuras a e b) e Tipo IV (fig. c e d), sendo corretamente detectadas pela segunda zona das funções 21 e 21N.

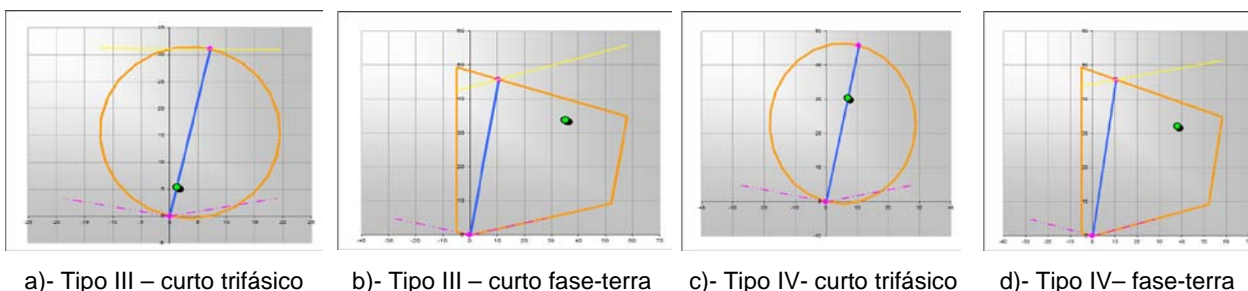


FIGURA 7- Falta trifásica e fase-terra (R = 13 Ohms) na barra remota. Parque com geradores III e IV.

Esses resultados podem ser considerados satisfatórios, dado que a função 67N pode ser facilmente ajustada para detectar as faltas com impedância elevada (por ex. 100 Ohms). Isso pode ser prontamente verificado considerando que a corrente de plena carga nessa linha é de 250 A (primários) e faltas fase-terra com impedância de 100 Ohms, ocorrendo na barra remota, produzem correntes nominais de 315 A (primários) no terminal local.

5.2 Proteção da Barra de 34.5 kV

Normalmente, em parques eólicos têm se usado para a proteção da barra de média tensão as unidades de sobrecorrente do secundário do transformador de entrada. Nessa solução, as unidades 51/51N precisam receber uma temporização adequada para poder coordenar com a proteção de sobrecorrente existente na saída dos alimentadores coletores de média tensão. Devido a essa temporização, essa solução pode apresentar algum risco operativo, pois a concessionária costuma ser uma fonte forte na entrada da SGE, ocasionando uma alta corrente de defeito na barra de média tensão, além da possível contribuição dos aerogeradores para o ponto de falta. Apresentam-se então como possíveis alternativas, a inclusão da barra na zona diferencial do transformador, podendo haver restrições sobre a aplicabilidade dessa solução dependendo da quantidade de alimentadores existentes. Outra alternativa poderia ser o uso de uma proteção diferencial de alta impedância, normalmente de baixo custo, o que é possível devido ao fato dessa barra ser normalmente de arranjo simples, sem outras condições operativas que possam requerer a implantação de lógicas mais sofisticadas. Neste caso, cuidados adicionais devem ser tomados para se evitar a saturação dos TC em questão e para se definir os ajustes proteção, de forma a se garantir sua efetiva discriminação entre defeitos internos e externos à barra. Outro ponto importante a ser observado seria a necessidade do uso de TC de mesmas características de relação e classe de precisão e se possível de mesmo fabricante.

5.3 Proteção dos Alimentadores de 34.5 kV

A maior dificuldade para o ajuste das funções utilizadas na proteção dos alimentadores de média tensão decorre do fato de que as atuais ferramentas computacionais utilizadas para o cálculo das correntes de curto-circuito não representam os diversos tipos de aerogeradores com o necessário detalhamento e precisão. Nessa situação, não é possível ao projetista conhecer com certeza a contribuição efetiva dos aerogeradores, em termos de magnitude e conteúdo sequencial, durante a ocorrência de faltas na rede de média tensão. Com a utilização da metodologia apresentada, no entanto, é possível determinar todos esses parâmetros como mostrado na Figura 6 e na Tabela 2.

Os resultados obtidos para a rede da Figura 1 mostram que com a utilização das funções 50/51 e 50/51N os alimentadores são protegidos de forma eficiente e segura. Considerando que a corrente de carga máxima do alimentador coletor é de 200 A (primários) e a corrente de regime permanente calculada para o curto dupla-fase no final desse alimentador ficou entre 5400 A (para geradores tipo I e II) e 7150 A (tipo IV), um ajuste de 300 A (primários) para a corrente de atuação da unidade 51 irá proporcionar proteção adequada para todo o alimentador. Já a unidade 50 deve ser ajustada para não ser sensível às faltas no lado de baixa tensão dos transformadores elevadores dos geradores, de forma que não ocorra falha de coordenação com a proteção do gerador. Faltas trifásicas nesse ponto resultaram em correntes de no máximo 600 A (primários) na saída do alimentador de média tensão. Dessa forma, um ajuste para a corrente de atuação da unidade 50 em torno de 750 A (primários) irá garantir a coordenação com a proteção do gerador e permitir a cobertura para faltas entre duas ou mais fases ao longo de todo o alimentador de média tensão. O ajuste das unidades 50/51N é feito de forma análoga e também fornece proteção adequada para as faltas envolvendo a terra na média tensão.

Para evitar a eventual atuação indevida das funções 50/51 durante faltas em um alimentador vizinho, é conveniente que estas unidades sejam monitoradas pela função direcional 67. Já para as funções 50/51N esse monitoramento é dispensável dado que, devido à conexão em delta dos transformadores elevadores, no lado da média tensão, não há contribuição dos geradores para faltas fase-terra.

6.0 - CONCLUSÕES

Dado a importância crescente da geração eólica no sistema elétrico brasileiro, é necessário que as ferramentas computacionais utilizadas para o cálculo das correntes de curto-circuito incluam uma modelagem precisa dos diversos tipos de geradores utilizados nessas instalações. Somente dessa forma o engenheiro de proteção poderá dispor dos dados necessários para realizar o projeto adequado do sistema de proteção da planta eólica.

Visando contribuir para esse objetivo, o artigo apresentou e discutiu os diagramas sequenciais necessários para representar os diversos tipos de aerogeradores utilizados atualmente nos parques eólicos. Os diagramas apresentados baseiam-se somente em dados facilmente disponíveis na etapa de projeto da planta eólica e fornecem resultados satisfatórios para estimação das contribuições das correntes de curto-circuito, inclusive os tipo III e IV, para os quais o comportamento sobre falta é ditado pelos controles dos conversores AC-AC.

Na segunda parte do trabalho, a metodologia apresentada foi aplicada ao estudo de um caso exemplo de parque eólico. Os resultados mostraram que com a utilização das funções de proteção discutidas e com a correta aplicação dos conceitos de proteção e seletividade obtém-se um sistema de proteção adequado e eficiente para esse tipo de instalação.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) KALSI, S. S.; STEPHEN, D D; ADKINS, B.; *Calculation of System Fault Currents Due to Induction Motors* - Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, vol. 118, p. 201-215, 1971.
- (2) SULLA, F; SVENSSON, J; SAMUELSSON, O – *Symmetrical and unsymmetrical short-circuit current of squirrel-cage and doubly-fed induction generators* – Electric Power Systems Research vol 81, 2011 pag. 1610-1618.
- (3) MORREN, J; HAAN, S W H – *Short-circuit of Wind Turbines with Doubly Fed Induction Generator* - IEEE Transactions on Energy Conversion, vol 22, march 2007, pag. 174-180.
- (4) HOWARD, D. F; *Short-Circuit Currents in Wind-Turbine Generator Networks* – Tese de Doutorado – Georgia Institute of Technology – December 2013.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Eduardo Cesar Senger: Mestre, Doutor e Livre Docente pela Escola Politécnica da USP. Docente da EPUSP, desde 1978, atua na área de Proteção e Automação de Sistemas Elétricos, ministrando disciplinas de graduação e pós-graduação. Atuou como coordenador de inúmeros projetos de P&D em parceria com concessionárias de energia elétrica e fabricantes de relés de proteção. Participou de diversos simpósios e congressos, nacionais e internacionais, com trabalhos publicados. É o responsável pelas atividades do Laboratório de Pesquisa em Proteção de Sistemas Elétricos – LProt.

Francisco Antonio Reis Filho, Graduado em Engenharia Elétrica (Sistemas de Potência) em 1981 pela UEVA/RJ. Obteve os títulos de mestre e doutor pela Universidade de São Paulo (Brasil) em 1992 e 2002, respectivamente. Tem trabalhado nos últimos 33 anos com Proteção de Sistemas Elétricos nas empresas Furnas Centrais Elétricas, ABB, SEG, SEL e GE. Atualmente trabalha como pesquisador no L-Prot (POLI-USP) e como consultor/diretor pela sua empresa na execução e coordenação de estudos elétricos de forma geral. Suas principais áreas de interesse são o desenvolvimento de algoritmos e o uso de novas ferramentas de classificação de sinais e eventos aplicados à proteção de sistemas elétricos. email : farfilho@farfilho.com.br