Simulações de Afundamento e Desequilíbrio de Tensão

Bárbara Carolina G. do Nascimento Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) barbaracgnascimento@gmail.com Natal, Brasil Paulo Ramon Oliveira de Lima Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) ramon.academic@gmail.com Natal, Brasil Prof. Dra. Crisluci Karina S. S. C. Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) crisluci@ct.ufrn.br Natal, Brasil

Resumo – Os distúrbios de tensão são fenômenos cujas distribuidoras e clientes buscam evitar para não interferir na qualidade da energia elétrica. Muitas intervenções são feitas na rede ao longo dos meses e isso impacta diretamente nas manobras pelos centros de operação de cada estado, sejam elas automáticas ou manuais. Com o intuito de simular esses defeitos para estudar formas de evita-los, foi gerado um circuito, no ANAREDE e analisados os impactos.

I. INTRODUÇÃO

No contexto do tema de qualidade da energia elétrica, existem alguns distúrbios que levam a queda de indicadores que a medem. Entre eles, por exemplo, pode-se citar: Afundamento, sobretensão e subtensão, interrupções, desequilíbrio, variações na frequência, transitórios, distorções na forma de onda (Nível CC, interharmônicos, ruídos, *notching* e harmônicos). No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica, Orgão regulador, dentro dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica (PRODIST), módulo 8, estabelece procedimentos a partir da qualidade da energia avaliando a qualidade do produto, serviço e atendimento a reclamações.

Neste artigo, será dissertado acerca de dois distúrbios simulados e executados no *software* Análise de redes elétricas (ANAREDE): Afundamento e desequilíbrio de tensão. A seguir, traz-se um breve resumo sobre cada um dos fenômenos citados no que diz respeito a normativos vigentes.

Palavras-chave: Afundamento; Desequilíbrio; Tensão; ANAREDE; Simulação.

II. AFUNDAMENTO DE TENSÃO

O afundamento de tensão é tido, na literatura internacional, como "variação de tensão de curta duração". Vale salientar que a análise dos afundamentos de tensão está diretamente relacionada à continuidade da operação dos clientes com cargas instaladas e em operação uma vez que os equipamentos possuem restrição quanto às variações de tensão de alimentação. Segundo o PRODIST, o afundamento de tensão pode ser classificado como momentâneo ou temporário, diferindo pelos tempos, sendo: Momentâneo superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos e o temporário superior a três segundos e inferior a três minutos, mas ambos com amplitude (valor eficaz) em relação à tensão de referência superior ou igual a 0,1 e inferior ou igual a 0,9 p.u. Nesse artigo, como não foi especificada a exigência em relação a classificação do afundamento da tensão, considerou-se o circuito simulado como temporário. Pode ser causado por curto circuito em qualquer ponto de fornecimento ou por partida de grandes motores.

III. DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

O desbalanceamento de tensão é denominado, pela ANEEL, como desequilíbrio de tensão e é definido matematicamente como a relação da tensão de sequência negativa e da tensão de sequência positiva no ponto de acoplamento comum entre a concessionária e o consumidor em qualquer ponto do sistema de potência. Caracteriza-se por qualquer diferença verificada nas amplitudes entre as três tensões de fase de um determinado sistema trifásico, e/ou defasagem elétrica de 120 ° entre as tensões de fase de um mesmo sistema. A causas mais comuns para esse tipo de fenômeno são: Problemas nas fontes, defeito nos capacitores, ocorrência de descargas atmosféricas, entre outros.

A expressão matemática para o cálculo do desequilíbrio da tensão é:

$$FD\% = V - V + * 100$$
, onde:

Tabela 1: Terminologia das variáveis para o cálculo do fator de desequilíbrio de tensão.

IDENTIFICAÇÃO DA GRANDEZA	SÍMBOLO
Fator de desequilíbrio de tensão	FD
Magnitude da tensão eficaz de sequência negativa – frequência fundamental	V-
Magnitude da tensão eficaz de sequência positiva - frequência fundamental	V+
Magnitudes das tensões eficazes de linha – frequência fundamental	Vab, Vbc e Vca
Valor do indicador FD% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	FD95%

A tolerância para o fator de desequilíbrio de tensão de uma rede depende da nominal, conforme tabelado no PRODIST.

Tabela 2: Limites para os desequilíbrios de tensão.

Indicador	Tensão	nominal
mulcauoi	Vn ≤ 1,0 kV	1 kV < Vn < 230kV
FD95%	3,0%	2,0%

IV. DADOS DO SISTEMA SIMULADO

Para a simulação dos fenômenos indicados acima, foi utilizado o ANAREDE. A seguir, algumas considerações acerca dos detalhes da simulação.

Tabela 3: Zonas de operação do sistema.

Zona de operação	Potência Aparente de Base [MVA]	Tensão Elétrica de Base [KV]	Impedância Elétrica de Base [Ω]
0	100	230	529
1	100	69	47,61
2	100	13,8	1,90

A. Sistema elétrico interligado

O diagrama que representa o sistema elétrico interligado objeto de estudo é apresentado na figura 1.



Figura 1: Sistema elétrico interligado.

B. Elementos, tipos de barra e zonas de operação.

O diagrama que representa o sistema elétrico interligado objeto de estudo com destaque a suas zonas de operação é apresentado na figura 2.



Figura 2: Detalhamento do circuito.

No ANAREDE, os parâmetros elétricos de operação devem estar representados em sistemas por unidade. Destacados os elementos, os tipos de barras e as zonas de operação do sistema é possível definir suas bases de operação e quantificar e modelar as características dos elementos (geradores, linhas de transmissão, transformadores etc) que os constituem. As zonas de operação do sistema são definidas pela tabela

A modelagem das barras, no ANAREDE, permitem 4 tipos de barras CA:

• 0 – PQ: Barra PQ;

3.

- 1 PV: Barra PV;
- 2 Referência: Barra de Balanço ou Referência;
- 3 PQ VLIM: Barra PQ com controle de módulo de tensão.

As barras do sistema podem ser sintetizadas abaixo:

Tabela 4: Informações das barras do sistema.

Barra	Zona de operação	Tipo	Módulo da tensão elétrica (p.u)	Fase da tensão elétrica (\circ)	Potência ativa do gerador [MVA]	Potência reativa do gerador [MVAr]	Potência ativa da carga [MVA]	Potência reativa da carga [MVAr]
01	0	2	1,00	0	0	0	0	0
02	1	0	1,00	0	0	0	0	0
03	1	0	1,00	0	0	0	0	0
04	1	0	1,00	0	0	0	0	0
05	1	0	1,00	0	0	0	0	0
06	1	0	1,00	0	0	0	0	0
07	1	0	1,00	0	0	0	0	0
08	1	0	1,00	0	0	0	0	0
09	1	0	1,00	0	10,0	0	19,0	13,5
10	1	0	1,00	0	10,0	0	15,0	11,0
11	1	0	1,00	0	0	0	12,0	7,50
12	1	0	1,00	0	0	0	3,10	2,40

As	modelagens	das	cargas	e	geradores	é	representada	no
ANAREDE. Abaixo, o detalhamento de cada uma.								

Número:	13 -	Nome:	Geração 1	
ieração A	liva		Fator de Participa	ção
Atual	10.	MW D	Potência 0. Ativa:	*
Minima: Máxima:	99999	MW MW	Potência 100 Reativa	
			Fator de Serviço	da Conente
Fator de Potência:			Amadura	2
Potência Aparente:		MVA	Rotor.	2
Ângulo de Carga		Graus	Reatância:	x

Figura 3: Gerador 1.

Barra Número:	9	•	Nome:	Cidade 1	
Carga Ativa			Carga R	eativa	
Carga:	19.	MW	Carga:	13.5	Mvai
A:	I	*	C:		x
B:		*	D:		x
Tensão Limite:		×	VDef:	1000	p.u
Ajuste V	Def (MDE	(F)			

Figura 4: Carga 1.

	*	Nome:	Cidade 2	
Carga Ativa		Carga Re	eativa	
Carga: 15.	MW	Carga:	11.	Mvai
A:	*	C:		z
B:	2	D:		x
Tensão Limite:	x	VD ef:	1000	p.u.

Figura 5: Carga 2.

Número: 1	1	Nome: C	idade 3	
Carga Ativa		Carga Re	ativa	
Carga: 12	MW	Carga:	7.5	Myar
A:	z	C:		x
B:	z	D:		z
Tensão Limite:	x	VDef:	1000	p.u.
Ajuste VDef	(MDEF)			



Número:	12	-	Nome:	Cidade 4	
Carga Ativa			Carga Re	sativa	
Carga:	3.1	MW	Carga:	2.4	Mvai
A:		x	C:		x
B:		*	D:		*
Tensão Limite:		x	VDef:	1000	pu

Figura 7: Carga 4.

A modelagem das linhas de transmissão foi feita com 8 linhas de transmissão, sendo LT1 uma linha de tamanho médio (80 km \le l < 240 km) e as demais linhas (LT2, LT3, LT4, LT5, LT6, LT7 e LT8) de tamanho curto(< 80 km).

Estas linhas podem ser representadas por seus circuitos equivalentes, respectivamente:



Figura 8: Linhas médias.



Figura 9: Linhas curtas.

Os parâmetros das linhas de transmissão são requisitados conforme a sua representação:

- Linha média: L (indutância) e C (Capacitância), encontradas tendo como base, para L, o fluxo concatenado no condutor e a corrente que o produz e, para C, a tensão e a carga no condutor, em Coulombs por metro;
- Linha curta: L (indutância), encontrada tendo como base o fluxo concatenado no condutor e a corrente que o produz.

Estes parâmetros são calculados conforme a geometria da linha de transmissão. Para as linhas de transmissão de geometria equilateral, temos que:



Figura 10: Geometria equilateral das linhas.

Para o cálculo da impedância nas linhas de geometria equilateral, temos:

$$L=rac{\mu_0}{2 imes\pi} imes \lnrac{\sqrt[3]{d_{ab}^2 imes d_{ac}}}{\sqrt[3]{r imes e^{-1/4} imes d^2}}$$

Para o cálculo da capacitância nas linhas de geometria equilateral, temos:

$$C = rac{2 imes \pi imes \epsilon_0}{\ln\left(rac{3\sqrt{d_{ab}^2 imes d_{ac}}}{\sqrt[3]{r imes e^{-1/4} imes d^2}}
ight)}$$

Onde:

- μ0 constante de permeabilidade do vácuo;
- ε0 constante de permissividade do vácuo;
- π constante pi;

- r raio do condutor;
- d distância entre os condutores;
- dab distância entre os trios de condutores a e b;
- dac distância entre os trios de condutores a e c;
- dab distância entre os trios de condutores a e b.

Para as linhas de transmissão de geometria linear, temos que:



Figura 11: Geometria linear.

Para o cálculo da impedância nas linhas de geometria linear, temos:

$$\begin{split} L &= \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times \ln \frac{\sqrt[3]{DMG_{ab} \times DMG_{ac} \times DMG_{bc}}}{\sqrt[3]{r \times e^{-1/4} \times d^2}} \\ DMG_{ab} &= \sqrt[4]{D_1^2 \times (D_1 + d) \times d} \\ DMG_{ac} &= \sqrt[4]{(D_1 + D_2)^2 \times (D_1 + D_2 + d) \times (D_1 + D_2 - d)} \\ DMG_{bc} &= \sqrt[4]{D_2^2 \times (D_2 + d) \times (D_2 - d)} \end{split}$$

Onde:

- µ0 constante de permeabilidade do vácuo;
- ε0 constante de permissividade do vácuo;
- π constante pi;
- r raio do condutor;
- d distância entre os condutores;
- D1 distância entre os pares de condutores a e b;
- D2 distância entre os pares de condutores b e c.

Uma vez definidas as geometrias adotas e os modelos de condutores a serem utilizados é possível sintetizar as características mecânicas e elétricas das linhas de transmissão do sistema, dadas por:

Tabela 5: Características mecânicas e elétricas.

Linha	Modelo do Cabo	Geometria	Comprimento [m]	Тіро	Raio do condutor [mm]
LT1	336,4 CAA – 26×7 f	Equilateral	130	Média	9,16
LT2	336,4 CA – 19 f	Linear	10	Curta	8,45
LT3	336,4 CA - 19 f	Linear	12	Curta	8,45
LT4	336,4 CA - 19 f	Linear	7,5	Curta	8,45
LT5	336,4 CA - 19 f	Linear	8	Curta	8,45
LT6	266,8 CA – 7 f	Linear	6,5	Curta	7,44
LT7	266,8 CA – 7 f	Linear	8	Curta	7,44
LT8	266,8 CA – 7 f	Linear	5,5	Curta	7,44

Sintetizadas as características mecânicas e elétricas das linhas de transmissão do sistema é possível calcular seus parâmetros elétricos de operação, dados por:

Tabela 6: Parâmetros elétricos de operação.

Linha	Admitância derivativa ou shunt (p.u)	Reatância indutiva (p.u)	Resistência elétrica (p.u)
LT1	j0,3504	0,0763	0,0418
LT2	0	0,0436	0,0355
LT3	0	0,0524	0,0426
LT4	0	0,0327	0,0266
LT5	0	0,0349	0,0284
LT6	0	0,0321	0,0291
LT7	0	0,0395	0,0358
LT8	0	0,0272	0,0281

Calculados os parâmetros elétricos de operação das linhas de transmissão do sistema é possível calcular os parâmetros elétricos das linhas de transmissão do sistema representados em sistemas por unidade, dados por:

Tabela 7: Parâmetros elétricos das linhas de operação.

Linha	Zona de operação	Frequência de operação [Hz]	Capacitância elétrica por metro [F / m]	Indutância elétrica por metro [H / m]	Resistência elétrica por metro [Ω / m]
LT1	0	60	1,35E-10	8,23E-07	1,70E-04
LT2	1	60	0	5,51E-07	1,69E-04
LT3	1	60	0	5,51E-07	1,69E-04
LT4	1	60	0	5,51E-07	1,69E-04
LT5	1	60	0	5,51E-07	1,69E-04
LT6	1	60	0	6,24E-07	2,13E-04
LT7	1	60	0	6,24E-07	2,13E-04
LT8	1	60	0	6,24E-07	2,13E-04

Linha	Capacitância elétrica [F]	Reatância capacitiva [Ω]	Indutância elétrica [H]	Reatância indutiva [Ω]	Resistência elétrica [Ω]
LT1	1,76E-06	4,66E-09	1,07E-01	7,63E-02	2,21E+01
LT2	0	0	5,50E-03	4,43E-02	1,69E+00
LT3	0	0	6,60E-03	5,31E-02	2,03E+00
LT4	0	0	4,1E-03	3,32E-02	1,27E+00
LT5	0	0	4,40E-03	3,54E-02	1,35E+00
LT6	0	0	4,10E-03	3,32E-02	1,39E+00
LT7	0	0	5,00E-03	4,08E-02	1,71E+00
LT8	0	0	3,40E-03	2,81E-02	1,17E+00

Estes são os parâmetros elétricos principais para a modelagem computacional das linhas de transmissão no ANAREDE.

Acerca da modelagem de transformadores, os fabricantes dos transformadores fornecem apenas um valor em p.u para a impedância dos transformadores pois o valor referido ao lado de alta tensão é igual ao valor referido ao lado de baixa tensão.

A reatância contida nas placas dos transformadores é calculada usando a potência nominal de operação como a potência de base para o sistema por unidade. Esta realidade aumenta a complexidade dos cálculos pois gera a necessidade de se inserir as relações de transformação nos cálculos das simulações. Para contornar esta complexidade, é possível recalcular a reatância dos transformadores utilizando um astuto artificio matemático que consiste na alteração da base atual de cálculo pela base de potência adotada pelo sistema. Este procedimento é conhecido como "mudança de base" e permite que os transformadores do sistema sejam representados por uma impedância simples nos cálculos das simulações de redes elétricas de potência.

Assim, os parâmetros elétricos dos transformadores do sistema representados em sistemas por unidade são sintetizados a seguir:

Tabela 8: Parâmetros dos transformadores.

Transformador	Zona de operação do primário	Zona de operação do secundário	Poténcia aparente nominal [MVA]	Reatância elêtrica (p.u) [%]	Potência de base [MVA]	Reatância elêtrica em nova base (p.u) [%]
T1	0	1	50	5,5	100	11
Т2	0	1	25	6,5	100	26
ТЗ	1	2	25	6,5	100	26
Τ4	1	2	25	6,5	100	26
Τ5	1	2	15	8,5	100	57
T6	1	2	5	12	100	240

Os parâmetros elétricos principais para a modelagem computacional dos transformadores no ANAREDE são a *potencia aparente nominal [kVA]* e a *reatância elétrica em nova base (p.u) [%]*.

V. SIMULAÇÃO DO AFUNDAMENTO DE TENSÃO

Dado o circuito descrito no item anterior, considerando um sinistro que cause um curto no trecho da subestação 1 para a cidade 2, com desarme da linha entre a cidade 1 e 2 como consequência, temos um exemplo de afundamento de tensão nas demais barras:



Figura 12: Trecho em curto - Afundamento de tensão.

Pode-se inferir que, após o curto, houve o afundamento de tensão nas barras abaixo, em p.u.:

Barra	Referência	Pós simulação	Variação
4	0,924	0,874	0,05
6	0,921	0,871	0,05
7	0.92	0.87	0.05
8	0.921	0.881	0.04
10	0,889	0.849	0.04
11	0,867	0.837	0.03
12	0.840	0.810	0,03
14	0,849	0.85	0,03
14	0,89	0,85	0,04

VI. SIMULAÇÃO DE DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

Para a simulação do desequilíbrio de tensão, considerouse a instalação de um *shunt* de barra, de 50 MVAr, na SE 1 do circuito, conforme figura 13, como simulação ao acionamento de elemento reativo não-linear no circuito.

Pode-se inferir que, após a inserção do *shunt*, houve o desequilíbrio de tensão nas barras citadas abaixo, todas em p.u.:

Barra	Referência	Pós simulação	Variação
2	0,962	1,002	0,04
3	0,932	1,012	0,08
4	0,924	1,004	0,08
5	0,922	1,002	0,08
6	0,921	1,001	0,08
7	0,92	1	0,08
8	0,921	1,001	0,08
9	0,881	0,971	0.09
10	0,889	0,969	0.08
11	0,867	0,947	0.08
12	0,849	0,929	0.08



Figura 13: Trecho com shunt – Desequilíbrio de tensão.

VII. CONCLUSÃO

Os distúrbios de tensão são fenômenos presentes no dia a dia e podem ser causados por diversos fatores que levam a queda da qualidade da energia fornecida aos consumidores. A partir da aplicação do curto e do desequilíbrio, foi possível obter as variações de tensão nas barras que permitirão, a posteriori, avaliar o desempenho acerca das proteções envolvidas no circuito.

REFERENCIAS

Programa ANAREDE – Curso básico. <http://www.cepel.br/> Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), último acesso em 18/10/2021.

Rocha, Ednardo P. da, Adriano F. Moura, Ednardo P. Rocha. *Análise de Fluxo de Carga em Sistemas de Potência*, Artliber, ISBN-10 8588098830, 2018.

Manual do Usuário do ANAREDE v10.01.03, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), 2016.

Rodrigues, João Paulo Careiro, Silva, Larissa de Paiva. *Avaliação da proteção de reatores shunt de linhas de transmissão*, 2014.

Diagramas do ANAREDE. Lima, Paulo Ramon Oliveira. https://eletrizado.com/diagramas-no-anarede/, último acesso em 18/10/2021.

Simulação no ANAREDE. Lima, Paulo Ramon Oliveira. https://eletrizado.com/simulacao-no-anarede/, último acesso em 18/10/2021.