



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI - UFSJ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA - DEPEL
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA ELÉTRICA - COELE

Cássia Reis Afonso de Freitas - 190900048

Gabriel Luis de Sousa - 180950030

Lucas Xavier de Moraes - 19095011

ESTUDO DE CASO 02

Professor: Dr. Fernando Aparecido de Assis

São João del-Rei - MG

Julho de 2024

SUMÁRIO

Lista de ilustrações	3
1 INTRODUÇÃO	4
1.1 Considerações Iniciais	4
1.2 Objetivos Geral e Específicos	4
2 METODOLOGIA	6
2.1 Análise do Sistema	6
3 RESULTADOS	9
4 CONCLUSÕES	10
Referências	11
ANEXOS	12

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Sistema de doze barras	4
Figura 2 – Tensão admissível entre fases a 60Hz	6

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) é formado por diversos equipamentos que atuam na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, por isso a análise e o estudo de seus compoenetes são de grande importância para garantir qualidade e segurança nas operações.

O sistema analisado a seguir, mostrado na figura 1, é composto por doze barras, das quais quatro possuem geradores e cinco têm cargas. Ademais, há três transformadores no sistema, separando uma área de 500kV e a outra onde a tensão base é de 230kV.

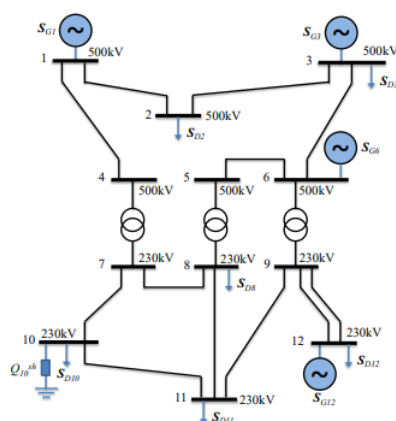


Figura 1 – Sistema de doze barras

Para atender o cenário de carga atual, este sistema viola os limites operativos de tensão nas barras, do fluxo de potência nos circuitos e na geração.

1.2 Objetivos Geral e Específicos

O sistema de doze barras, atende a um cenário que faz com que alguns de seus limites de tensão e potência sejam violados. Objetivando que o sistema atue de maneira estável e garantindo que a carga seja atendida com qualidade e sem falhas na transmissão, alguns ajustes são necessários para chegar a um novo ponto de operação no qual os limites de magnitude de tensão, geração de potência ativa dos geradores e fluxo de potência aparente nos circuitos sejam respeitados. O cenário inicial de violações do sistema é apresentado nas tabelas 1, 2 e 3.

Barra	Ângulo (Deg)	Tensão (PU)	Base de tensão (kV)
1	-3.0314	1.0200	500
2	-3.0761	1.0109	500
3	-0.0000	1.0100	500
4	-9.2635	0.9747	500
5	-5.6643	0.9834	500
6	-3.6406	1.0100	500
7	-6.4160	0.9776	230
8	-9.7247	0.9461	230
9	-6.7335	1.0799	230
10	-13.2399	0.9267	230
11	-10.4664	0.9484	230
12	-5.4141	1.0000	230

Tabela 1 – Tabela de tensão e defasagem por barra - Sistema inicial

Barra	PG(PU) PU	CGmax(PU) PU
1	0.95	1.20
3	1.13	1.00
6	0.55	1.00
12	0.35	0.80

Tabela 2 – Potência de geração - Sistema inicial

A partir das tabelas, verifica-se que o sistema viola vários limites operativos. Em relação aos limites de tensões, estes são violados nas barras 4 e 5, de 500kV. Nestas barras a tensão deve operar entre 1.0 p.u. e 1.1 p.u. Portanto, nestas barras deverá ser feito uma aumento de tensão. Já nas barras de 230kV, há violação nas barras de 8 a 11. Nestas, os limites operativos devem ficar entre 0.95 p.u., e 1.05 p.u.. Nestes casos, deverá ser feito um ajuste de modo a aumentar as tensões das barras 8, 10 e 11, e outro para diminuir a tensão da barra 9.

Em relação à potência de geração, percebe-se que o limite de geração do gerador 3 é violado. Logo, esta potência deverá ser redistribuída entre os outros geradores do sistema.

Por fim, há limites de potência ativa violada nos circuitos 5, 8 e 12. Sendo que dois destes circuitos, 5 e 8, são transformadores.

NCIR	BDE	BPARA	SKM(kVA)	SMK(kVA)	Cap. Máx.(kVA)
1	1	2	13.67	16.04	100.00
2	1	4	89.16	85.16	100.00
3	2	3	26.67	27.19	100.00
4	3	6	35.19	34.60	100.00
5	4	7	85.16	85.41	80.00
6	5	8	30.39	29.23	80.00
7	5	6	30.39	31.21	80.00
8	6	9	107.23	99.70	80.00
9	7	8	45.51	44.05	50.00
10	7	10	40.64	38.52	50.00
11	8	11	5.70	5.71	50.00
12	9	11	53.32	46.83	50.00
13	9	12	31.74	29.39	50.00
14	9	12	31.74	29.39	50.00
15	10	11	15.33	15.69	50.00

Tabela 3 – Fluxos de potência - Sistema inicial

2 METODOLOGIA

2.1 Análise do Sistema

Logo na primeira análise foi possível identificar seis violações de tensão no sistema, e para solucioná-las foram propostas e analisadas alterações nos TAPs dos transformadores e nas tensões das barras. Essas análises foram feitas tendo como referência a tabela de tensões admissíveis entre fases a 60Hz, disponível no site do Operador Nacional do Sistema Elétrico, e apresentada na figura 2.

Tensão nominal de operação ⁽¹⁾	Condição operativa normal		Condição operativa de emergência	
	(kV)	(pu) ⁽²⁾	(kV)	(pu) ⁽²⁾
≤ 138	—	0,95 a 1,05	—	0,90 a 1,05
230	218 a 242	0,95 a 1,05	207 a 242	0,90 a 1,05
345	328 a 362	0,95 a 1,05	311 a 362	0,90 a 1,05
440	418 a 460	0,95 a 1,046	396 a 460	0,90 a 1,046
500	500 a 550	1,00 a 1,10	475 a 550	0,95 a 1,10
525	500 a 550	0,95 a 1,05	475 a 550	0,90 a 1,05
765	690 a 800	0,90 a 1,046	690 a 800	0,90 a 1,046

(1) Valor eficaz de tensão pelo qual o sistema é designado (Res. Aneel 505/2001).

(2) Valores em pu tendo como base a tensão nominal de operação.

Figura 2 – Tensão admissível entre fases a 60Hz

Para encontrar o ponto de operação do sistema as violações apresentadas foram analisadas

de acordo com a tabela mostrada na figura 2. Adotou-se então uma abordagem experimental, na qual foram realizadas algumas tentativas e, com base em seus resultados novos ajustes eram realizados. A barra com maior violação foi encontrada e a partir dela as modificações foram realizadas. Caso a alteração proposta solucionasse o problema em questão, as atenções eram voltadas para a próxima violação, caso a primeira violação não fosse solucionada, era feito então um novo ajuste, levando em consideração como o ajuste anterior alterou o sistema.

Com base nos conhecimentos adquiridos de análise de sistema de potência, serão feitos alguns ajustes, através de tentativa e erro, para atingir o objetivo de operar o sistema dentro dos limites operativos.

O controle de tensão nas barras pode ser feito através do fornecimento de mais energia reativa nas barras geradoras PV ou então nos equipamentos de suporte de reativo do sistema. Ao aumentar as tensões do *set-point* dos geradores, ou chavear os suportes de reativo, estes fornecem mais potência reativa. Assim, há um aumento nas tensões das barras à montante também.

Outra maneira de controlar as tensões no sistema é ajustando os TAPs dos transformadores. Ao mudar o TAP, muda-se a relação de transformação da tensão, e assim é possível aumentar ou diminuir as tensões nas barras de operação do sistema.

Para controlar a potência de geração do sistema, pode-se redistribuir a geração entre os outros geradores do sistema.

Por fim, o controle do fluxo de potência no sistema pode ser feito ao alterar o TAP de transformadores defasadores. Ao mudar a diferença angular entre duas barras, verifica-se uma alteração no fluxo de potência no sistema. De uma maneira bem abreviada, o fluxo de potência ocorre da barra de maior abertura angular para a de menor. O transformador defasador é capaz de aplicar uma abertura angular tanto positiva como negativa, sendo possível assim enviar o fluxo de potência para ambos os lados de um transformador defasador.

Portanto, com essas ideias em mente, foram feitos ajustes por tentativa de erro no sistema. Os ajustes propostos são listados:

1. Barra 1 mudou Vesp(PU) de 1.02 -> 1.07
2. Barra 1 mudou PGesp(PU) de 0.95 -> 1.1
3. Barra 6 mudou Vesp(PU) de 1.01 -> 1.03
4. Barra 12 mudou PGesp(PU) de 0.35 -> 0.6
5. Circuito 5 mudou TAP(PU) de 1.0 -> 1.05

6. Circuito 5 mudou DEF(GRAUS) de 5.0 -> -6.2
7. Circuito 8 mudou TAP(PU) de 1.15 -> 1.05
8. Circuito 8 mudou DEF(GRAUS) de 0.0 -> -4.0

Estes ajustes apresentam resultados satisfatórios (Detalhados em anexo) e que respeitam os limites. Porém, há algumas melhorias que podem ser feitas para que o sistema opere com maior margem de segurança.

Para estas melhorias, foi feito um ajuste com a ajuda de uma técnica conhecida como ajustes alternados. Nesta técnica, é empregada uma metodologia iterativa onde são feitas pequenas alterações no sistema baseada na diferença entre o estado atual e o desejado até que a diferença entre os dois seja menor que uma tolerância. Por exemplo, podem ser feitos pequenos ajustes na relação de transformação de um transformador para precisamente elevar a tensão em uma barra.

Assim, uma melhor solução é apresentada ao realizar os seguintes ajustes no sistema:

1. Barra 1 mudou Vesp(PU) de 1.02 -> 1.0773
2. Barra 1 mudou PGesp(PU) de 0.95 -> 1.1
3. Barra 3 mudou Vesp(PU) de 1.01 -> 1.0173
4. Barra 6 mudou Vesp(PU) de 1.01 -> 1.0373
5. Barra 12 mudou Vesp(PU) de 1.0 -> 1.0201
6. Barra 12 mudou PGesp(PU) de 0.35 -> 0.6
7. Circuito 5 mudou TAP(PU) de 1.0 -> 1.01
8. Circuito 5 mudou DEF(GRAUS) de 5.0 -> -6.2
9. Circuito 8 mudou TAP(PU) de 1.15 -> 1.023
10. Circuito 8 mudou DEF(GRAUS) de 0.0 -> -4.0
11. Circuito 12 mudou TAP(PU) de 1.0 -> 1.0114

3 RESULTADOS

Os resultados dos ajustes alternados são apresentados nas tabelas 4, 5 e 6.

Barra	Ângulo (Deg)	Tensão (PU)	Base de tensão (kV)
1	0.8987	1.0773	500
2	0.0496	1.0561	500
3	-0.0000	1.0173	500
4	-3.2226	1.0213	500
5	-5.8225	1.0134	500
6	-2.3425	1.0373	500
7	-11.0224	1.0259	230
8	-12.4413	0.9918	230
9	-7.8955	1.0387	230
10	-16.6543	0.9640	230
11	-13.0643	0.9682	230
12	-6.0130	1.0201	230

Tabela 4 – Tabela de tensão e defasagem por barra - Ajustes alternados

Barra	PG(PU) PU	CGmax(PU) PU
1	1.10	1.20
3	0.67	1.00
6	0.55	1.00
12	0.60	0.80

Tabela 5 – Potência de geração - Ajustes alternados

NCIR	BDE	BPARA	SKM(kVA)	SMK(kVA)	Cap. Máx.(kVA)
1	1	2	44.83	45.66	100.00
2	1	4	75.01	71.69	100.00
3	2	3	18.97	20.51	100.00
4	3	6	26.16	25.29	100.00
5	4	7	71.69	71.30	80.00
6	5	8	47.35	46.34	80.00
7	5	6	47.35	48.47	80.00
8	6	9	34.98	34.24	80.00
9	7	8	31.60	30.55	50.00
10	7	10	39.70	37.31	50.00
11	8	11	12.43	12.13	50.00
12	9	11	43.27	39.87	50.00
13	9	12	14.12	13.87	50.00
14	9	12	14.12	13.87	50.00
15	10	11	19.24	19.32	50.00

Tabela 6 – Fluxos de potência - Ajustes alternados

Ao final, o sistema foi ajustado e opera em um estado normal seguro. Houveram modificações na tensão de barras, no TAP e na defasagem de alguns transformadores. Estes ajustes possibilitaram alterações nas potências ativa e reativa do sistema, fazendo com que a carga demandada fosse atendida.

A validação dos resultados foi feita por meio de simulações utilizando o software Power World, que confirmou a estabilidade do sistema.

4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos durante o processo de estabilização do sistema tratado demonstraram na prática aquilo que foi aprendido de maneira teórica, em sala sobre os limites de operação dos sistemas elétricos e sobre como são feitos os controles do mesmo e, ao final, o sistema voltou a operar de maneira segura, atendendo às cargas demandadas. É notório que a abordagem heurística utilizada para solucionar as violações de operação e encontrar o ponto de operação do sistema não é o mais seguro, tendo em vista que a depender do ajuste realizado havia a possibilidade de fazer com que o sistema operasse em um estado crítico, no entanto, os ajustes realizados tinham um excelente embasamento teórico, o que possibilitou que o sistema voltasse a operar em um estado normal seguro.

REFERÊNCIAS

- [1] Fernando A. Assis, “Notas de aula.” Online, 2024. [Acesso em julho 2024].
- [2] “Submódulo 23.3: Diretrizes e critérios para estudos elétricos,” Procedimentos de Rede - ONS.
- [3] G. A. MONTICELLI, A.J, *Introdução a sistemas de energia elétrica*. Ed. Unicamp, 2003.

ANEXOS

Os ajustes propostos por tentativa e erro, resultam nos valores apresentados nas tabelas 7, 8 e 9.

Barra	Ângulo (Deg)	Tensão (PU)	Base de tensão (kV)
1	0.5719	1.0700	500
2	-0.2130	1.0489	500
3	-0.0000	1.0100	500
4	-3.5459	1.0016	500
5	-5.8223	1.0123	500
6	-2.2396	1.0300	500
7	-11.3326	1.0429	230
8	-12.4555	1.0020	230
9	-7.6599	1.0428	230
10	-16.7659	0.9764	230
11	-13.0872	0.9735	230
12	-5.1300	1.0000	230

Tabela 7 – Tabela de tensão e defasagem por barra - Tentativa e erro

Barra	PG(PU) PU	CGmax(PU) PU
1	1.10	1.20
3	0.68	1.00
6	0.55	1.00
12	0.60	0.80

Tabela 8 – Potência de geração - Tentativa e erro

NCIR	BDE	BPARA	SKM(kVA)	SMK(kVA)	Cap. Máx.(kVA)
1	1	2	43.14	44.06	100.00
2	1	4	80.00	75.72	100.00
3	2	3	18.93	20.49	100.00
4	3	6	24.94	24.04	100.00
5	4	7	75.72	75.08	80.00
6	5	8	46.99	46.51	80.00
7	5	6	46.99	47.81	80.00
8	6	9	46.05	44.40	80.00
9	7	8	34.62	33.26	50.00
10	7	10	40.66	38.07	50.00
11	8	11	14.76	14.34	50.00
12	9	11	41.26	38.52	50.00
13	9	12	22.83	21.90	50.00
14	9	12	22.83	21.90	50.00
15	10	11	20.12	20.06	50.00

Tabela 9 – Fluxos de potência - Tentativa e erro