

1 Contexto

Em sistemas elétricos, especialmente em bancos de capacitores de média tensão, pequenos desequilíbrios são naturais e geralmente esperados durante a operação. Esses desequilíbrios podem ser causados por diversas razões, como diferenças mínimas nas características dos capacitores individuais, variações nas tensões de alimentação, ou condições de carga ligeiramente desiguais. Em níveis baixos, esses desequilíbrios não comprometem a segurança ou a eficiência do sistema e são considerados dentro dos parâmetros normais de operação.

Os bancos de capacitores são projetados para tolerar certos níveis de desequilíbrio sem prejuízos significativos. No entanto, é crucial monitorar continuamente esses desequilíbrios para garantir que permaneçam dentro de limites aceitáveis. Instrumentação adequada e sistemas de monitoramento ajudam a identificar e registrar os níveis de desequilíbrio, permitindo uma gestão proativa da operação do banco de capacitores.

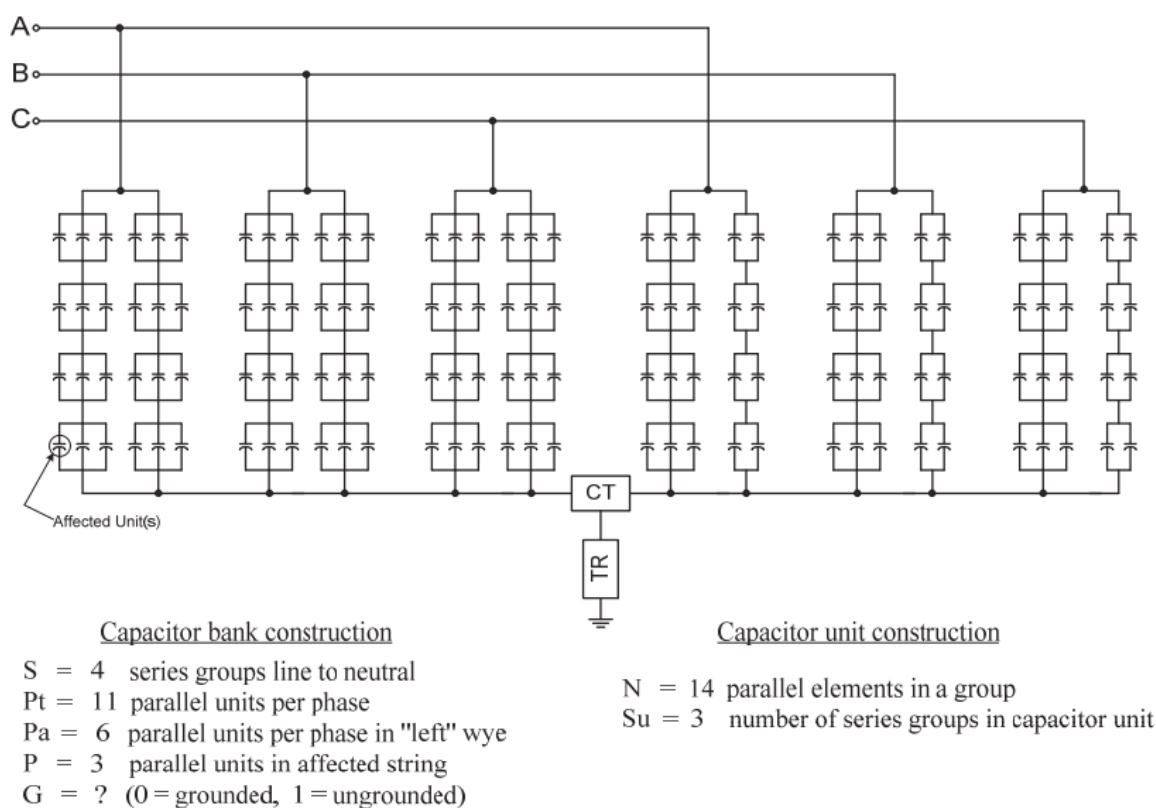


Figura 1: Ilustração de um banco em dupla estrela assimétrica [1].

Em uma configuração estrela, o neutro do banco de capacitores não é conectado diretamente à terra. Em condições normais de operação, a tensão V_{OG} (entre neutro e terra) e/ou a corrente I_n (entre estrelas) é muito baixa (idealmente zero). No entanto, no caso de queima parcial de unidades capacitivas, essas grandezas aumentam, indicando a necessidade de uma intervenção, a depender de seu valor.

Para monitorar essas grandezas deslocamento, um Transformador de Potencial (para estrela simples isolada) ou um Transformador de Corrente (dupla estrela isolada) é utilizado para medir a tensão de deslocamento de neutro ou a corrente de desequilíbrio entre as estrelas.

Por fim, o relé do disjuntor associado ao banco de capacitores comunica-se com o sistema supervisor, permitindo a detecção e o monitoramento em tempo real das condições operacionais e facilitando a tomada de

decisão remota em caso de anomalias na tensão de deslocamento do neutro ou corrente de desequilíbrio entre as estrelas.

2 Banco em Tela

Trata-se de um banco de capacitores configurado em dupla estrela isolada, no qual os capacitores são do tipo com fusíveis internos. Esse arranjo é frequentemente utilizado em sistemas de média tensão com o objetivo de compensar reativos, melhorar o fator de potência e reduzir perdas no sistema elétrico. A configuração em dupla estrela oferece maior robustez e continuidade de serviço, uma vez que permite melhor distribuição das tensões entre os capacitores e maior tolerância a falhas individuais. A utilização de fusíveis internos em cada capacitor permite a desconexão automática da unidade em caso de falha interna, evitando a propagação de danos e facilitando a manutenção do banco como um todo.

Tabela 1: Dados de Entrada do Banco de Capacitores.

Parâmetro	Valor
Frequência (Hz)	60
Potência Nominal (MVar)	16.9
Tensão Nominal (kV)	44.9
Potência de Trabalho (MVar)	10.0
Tensão de Trabalho (kV)	34.5
S - Unidades em Série	3
Pt - Unidades em Paralelo (total)	2
Pa - Unidades em Paralelo da Fase Afetada	1
P - Unidades em Paralelo na String Afetada	1
G - Aterramento (0) / Isolamento (1)	1
N - Elementos em Paralelo das Unidades	29
Su - Elementos em Série das Unidades	3

3 Níveis de Alerta e de Ação

Quando os desequilíbrios excedem um nível determinado, mas ainda estão abaixo de um ponto crítico, é necessária atenção redobrada. Esse nível inicial de alerta indica que algo pode estar se desenvolvendo no sistema que requer investigação. Nessa fase, medidas de diagnóstico adicionais devem ser adotadas para identificar a causa do desequilíbrio. Manutenções preventivas, inspeções e ajustes podem ser necessários para corrigir ou mitigar as causas subjacentes.

4 Nível de Preocupação

Se o desequilíbrio continuar a aumentar e atinge um nível maior, ele deve ser tratado com preocupação. Nesta fase, o desequilíbrio pode começar a afetar negativamente a eficiência e a segurança do sistema. Os técnicos responsáveis devem realizar uma análise detalhada para determinar se há componentes defeituosos, deterioração dos capacitores, problemas de conexão ou outras falhas que possam estar contribuindo para o desequilíbrio.

5 Nível crítico - desligamento do banco

Acima de um certo nível crítico de desequilíbrio, a operação contínua do banco de capacitores pode se tornar perigosa e ineficiente. Esse nível crítico é um ponto de ação definitiva, onde o banco de capacitores deve ser desligado imediatamente para evitar danos aos equipamentos, riscos de segurança e interrupções no fornecimento de energia. O desligamento permite uma inspeção completa e a implementação das correções necessárias antes de o banco de capacitores ser colocado de volta em operação.

6 TC ou TP de neutro

A Tabela 2 é uma análise detalhada das condições operacionais de um banco de capacitores, levando em consideração a perda de elementos capacitivos. Esta análise segue as diretrizes estabelecidas pelo IEEE Std 18 - *IEEE Standard for Shunt Power Capacitors* [2], que fornece critérios para proteção e operação de capacitores de potência em sistemas de energia elétrica.

Tabela 2: Tabela de desbalanço (Tensões de alarme e desligamento automático do banco de capacitores)

f	V_e [pu]	V_{cu} [pu]	V_{cu} [pu work]	V_{ln} [pu]	I_u [pu]	V_{ng} [pu]	V_{ng} [V]	I_n [A]
0	1.0000	1.0000	0.7692	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1	1.0323	1.0086	0.7758	1.0007	0.9967	0.0007	13.1302	0.1655
2	1.0668	1.0177	0.7829	1.0014	0.9932	0.0014	27.1370	0.3420
3	1.1036	1.0275	0.7904	1.0021	0.9894	0.0021	42.1112	0.5307
4	1.1431	1.0380	0.7984	1.0029	0.9854	0.0029	58.1565	0.7329
5	1.1855	1.0492	0.8071	1.0038	0.9811	0.0038	75.3921	0.9501
6	1.2311	1.0613	0.8164	1.0047	0.9764	0.0047	93.9556	1.1841
7	1.2805	1.0744	0.8265	1.0057	0.9714	0.0057	114.0066	1.4368
8	1.3339	1.0886	0.8374	1.0068	0.9659	0.0068	135.7314	1.7105
9	1.3920	1.1040	0.8492	1.0080	0.9600	0.0080	159.3487	2.0082
10	1.4554	1.1208	0.8622	1.0093	0.9535	0.0093	185.1170	2.3329
11	1.5248	1.1392	0.8763	1.0107	0.9464	0.0107	213.3441	2.6886
12	1.6012	1.1595	0.8919	1.0123	0.9387	0.0123	244.3998	3.0800
13	1.6857	1.1819	0.9092	1.0140	0.9300	0.0140	278.7315	3.5127
14	1.7795	1.2068	0.9283	1.0159	0.9205	0.0159	316.8866	3.9935
15	1.8845	1.2347	0.9497	1.0181	0.9097	0.0181	359.5412	4.5311
16	2.0026	1.2660	0.9738	1.0205	0.8977	0.0205	407.5414	5.1360
17	2.1364	1.3015	1.0012	1.0232	0.8840	0.0232	461.9590	5.8218
18	2.2895	1.3421	1.0324	1.0263	0.8684	0.0263	524.1733	6.6058
19	2.4661	1.3890	1.0684	1.0299	0.8504	0.0299	595.9891	7.5109
20	2.6724	1.4437	1.1105	1.0341	0.8294	0.0341	679.8152	8.5673
21	2.9162	1.5084	1.1603	1.0391	0.8045	0.0391	778.9391	9.8165
22	3.2090	1.5861	1.2201	1.0451	0.7746	0.0451	897.9690	11.3166
23	3.5672	1.6811	1.2931	1.0524	0.7380	0.0524	1043.5705	13.1515
24	4.0154	1.8000	1.3846	1.0615	0.6923	0.0615	1225.7590	15.4475
25	4.5924	1.9531	1.5024	1.0733	0.6334	0.0733	1460.3068	18.4034
26	5.3630	2.1575	1.6596	1.0890	0.5548	0.0890	1773.5726	22.3513
27	6.4444	2.4444	1.8803	1.1111	0.4444	0.1111	2213.1760	27.8913
28	8.0722	2.8763	2.2125	1.1443	0.2784	0.1443	2874.8472	36.2300

Neste caso específico, cada célula capacitiva do banco é composta por N elementos em paralelo e Su elementos em série. Essa configuração garante uma distribuição adequada da tensão e corrente entre os elementos,

aumentando a confiabilidade e a capacidade do banco de suportar variações operacionais.

Esta tabela, baseada nas diretrizes do IEEE Std 18, é uma ferramenta valiosa para a operação segura de bancos de capacitores. Ela permite que engenheiros identifiquem rapidamente quando o sistema está se aproximando de condições perigosas, acionando alarmes e trips conforme necessário para proteger os capacitores e o sistema elétrico como um todo. A configuração específica de N elementos em paralelo e Su em série deve ser cuidadosamente monitorada para garantir que a tensão, corrente e capacitância permaneçam dentro dos limites operacionais seguros, prevenindo falhas catastróficas e garantindo a continuidade do serviço.

A filosofia de proteção adotada é no sentido de que a tensão em nenhuma célula supere os 10% da tensão nominal da unidade. Os números na cor **azul** da Tab. 2 são os sugeridos para alarme e os números na cor **vermelha** da Tab. 2 para o desligamento.

7 Fator de Segurança

Em alguns casos usa-se capacitores para correção do fator de potência com tensão nominal acima da tensão de trabalho, mantendo-se a capacitância, devido a três razões principais:

1. Margem de segurança elétrica: capacitores operando próximos ao seu limite de tensão nominal estão mais sujeitos a:
 - envelhecimento precoce do dielétrico,
 - falhas por surtos,
 - degradação térmica.
2. Durabilidade e confiabilidade: capacitores operando abaixo de sua tensão nominal sofre menor estresse dielétrico, o que reduz:
 - geração de calor,
 - risco de ruptura interna,
 - frequência de manutenção.
3. Flexibilidade na aplicação: capacitores com tensão nominal superior podem ser reutilizados em outras redes com tensão mais alta, aumentando a versatilidade do equipamento.

É importante notar que a potência reativa fornecida por um capacitor é dada por $Q = V^2 \cdot C \cdot \omega$, ou seja, depende da tensão efetiva aplicada, não da tensão nominal do capacitor. Assim, se a tensão da rede (tensão de trabalho) for mantida constante, a potência reativa fornecida continuará a mesma, mesmo que o capacitor tenha uma tensão nominal mais alta — desde que a capacitância seja mantida.

Referências

- [1] IEEE, *IEEE Guide for the Protection of Shunt Capacitor Banks*, <https://standards.ieee.org/ieee/C37.99/5511/>, IEEE Std C37.99-2012, 2012.
- [2] IEEE, *IEEE Standard for Shunt Power Capacitors*, <https://ieeexplore.ieee.org/document/6466331>, IEEE Std 18-2012, 2012.



Proteção de Banco de Capacitores

Emissão: 16/05/2025
Folha: 5/5

Angelo A. Hafner
Engenheiro Eletricista
Doutor em Eletromagnetismo
CONFEA: 2.500.821.919
CREA/SC: 045.776-5

Daniel H. Pires
Engenheiro Eletricista
Especialista em Sistemas de
Potência
CONFEA: 7.718.547.498
CREA/PR: 179.137/D

Fabricio R. Frangiotti
Engenheiro Eletricista
Especialista em Capacitor de
Potência
CREA/SP: 5061.769.065/D