

大規模化学プラントにおける 瞬時電圧低下の影響と対策

(プラントエンジニアのために)
トラブル事例とその対策を中心に

旭化成(株)
加戸 良英(かど よしひで)

報告の前提(1/2)

当報告は、石油コンビナートや大規模化学工場のように大形誘導電動機を多く抱えるプラントを対象とします。これらには下記特徴があります。

1. 大電力を消費し負荷の誘導電動機比率が高く(高圧機の容量が支配的)、UPS(無停電電源装置)は計装設備を含む制御系電源と一部の非常用電源(照明、他)をバックアップするのみであり、これらの瞬低補償の範囲は負荷全体からみると僅かである。
2. 生産設備は連続プロセス主体であって、ライン制御系等とは異なり、瞬低による電動機の僅かな回転数変化、トルク変化の影響は回避できる場合がある。

報告の前提(2/2)

3. 一方で、一旦プラントが停止すると再立ち上げに多大な時間(数日~数週)と労力を要し機会損失も甚大であることが多い。

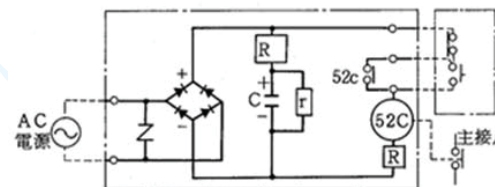


高速スイッチによる電源切替方式(商用電源と自家発電設備等)、直列・並列方式による電圧低下補償等の瞬低対策装置では、プラント内の全ての負荷を救うことは困難な場合が多い。

用語の解説(誘導電動機の瞬低対策)

誘導電動機駆動回路の電磁接触器(開閉器)JEM 1038, 1167に対し

1. ラッチ形電磁接触器 : 機械的機構または永久磁石により、瞬低および停電が発生した際にも閉路を維持する。
2. 遅延釈放形回路 : コンデンサの効果によって閉路を維持。



用語の解説(誘導電動機の瞬低対策)

3. 直流またはUPS電源制御方式
4. 再閉路方式 : 制御回路構成または専用の制御装置により電圧低下によって一旦開路(釈放, 離落)した電磁接触器を電圧回復後再閉路させる。
5. 順次(グループ)再閉路方式 : 上記 4. の再閉路方式にて電圧回復後多数の電動機に対しグルーピングして順に閉路し再加速(再始動)させる方式。

ここでは1~3を『閉路維持方式』と呼ぶ

トラブル事例

	事例概要	留意事項
1	大型回転機の潤滑油圧低下を検出して装置がインターロック停止しプラント全体が停止に至った。	瞬低対策を行った場合も回転数変化にともなうプロセス圧力, 流量変化は避けられない。
2	ボイラ燃料油噴燃ポンプの吐出圧力低下を検出してボイラがインターロック停止しプラント全体が停止した。	
3	瞬低の電圧回復後, 多数の電動機が一斉に再加速して幹線フィーダの過電流継電器が動作し遮断器がトリップ, プラントの一部が停止した。	瞬低で一旦すべりが増した多数の電動機が再加速し大きな負荷電流が流れた。

トラブル事例

	事例概要	留意事項
4	再閉路方式にて, 瞬低で電磁接触器の開信号が出力され, その信号でプラントインターロックが走り, 電動機は再始動したもののプラント全体は停止に至った。	プラントのインターロック構築方法を検討しておく必要がある。
5	比較的長時間継続した瞬低の際に, 負荷末端の電圧回復が遅れ, 供給フィーダが過電流でトリップした。	すべりが増すとともに無効電力の消費も増し, 電圧回復を難しくする。

トラブル事例

	事例概要	留意事項
6	再閉路方式にて, 誘導電動機の残留電圧による突入電流で幹線MCCBがトリップした。	再閉路方式(順次再閉路方式)は残留電圧問題のリスクを評価しておく必要がある。
7	同様に, 残留電圧問題にてカップリングや軸の機械的破損が生じたとの報告がある。	

【残留電圧問題】

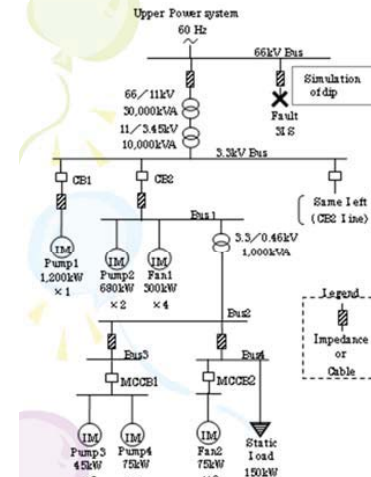
再閉路(再投入)の際に残留電圧と電源電圧の位相のずれによって突入電流に加え大きな過渡トルクが発生し, 保護装置の不要動作や機械軸・カップリングの損傷が発生する。

トラブル事例

	事例概要	留意事項
8	上位系統の事故で瞬低が発生した際、構内高压電動機の一部が欠相保護でトリップした。	2線短絡の電圧不平衡で電動機保護要素の欠相保護(不平衡保護)が不要動作する。
9	プラント構内にて、低压電動機端子箱内の2線(单相)短絡で低压系統の瞬低が発生した際、同一変圧器の系統内で電動機2台だけが欠相保護でトリップした。	
10	電圧不平衡率の大きな瞬低発生の際に、低压負荷を補償する500kVA瞬低補償装置が正常動作せず生産が停止した。	電圧不平衡率が大きな場合は正常動作できなかった。

瞬低の電圧不平衡に起因する問題。

9



このモデル系統を使った解析にて、事例1~5の原因を解説する。(実効値解析を実施して検証)

Load	Induction Motor				Inertia Constant (H)
	Volt	(kW)	Poles	Ts (%)	
Pump1	3,300	1,200	6	90	0.4
Pump2	3,300	680	6	90	0.4
Pump3	440	45	2	120	0.4
Pump4	440	75	4	160	0.4
Fan1	3,300	300	4	90	6.0
Fan2	440	75	4	236	6.0

The load machine torque characteristics are square reduction.

10

Fig.2 解析のモデル系統

事例1~3 解析

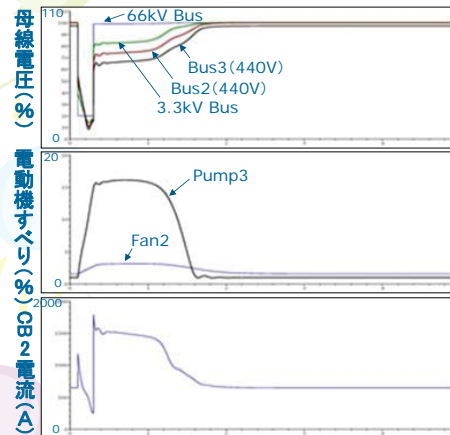


Fig.3 解析結果

【解析条件】

- ①瞬低継続中全ての電磁接触器は閉路を維持
- ②瞬低の電圧低下80%, 0.2秒継続

【解析結果】

- ①事故除去後も440V母線電圧は70%以上に回復しない。
⇒電子式制御方式の瞬低回復電圧に達しない
- ②ポンプの回転数は85%程度まで減速し約1秒間継続
⇒流体の流量・圧力低下でプラントインターロック作動のリスクあり
- ③幹線フィーダの電流は常時の2倍以上が1秒程度継続
⇒過電流継電器が不要動作するリスクあり

11

事例1&2 の対策例

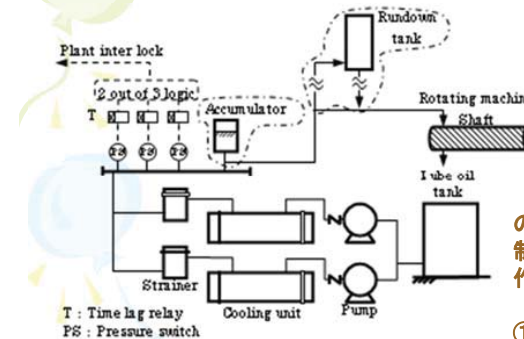


Fig.4 潤滑油系の対策例

瞬低継続中及び事故除去後のプロセス圧力・流量変化を抑制し不要なインターロックを動作させないために

- ①アキュムレータの装備
- ②(潤滑油系であれば)ランダウンタンクの設置

12

事例1~3 の対策例

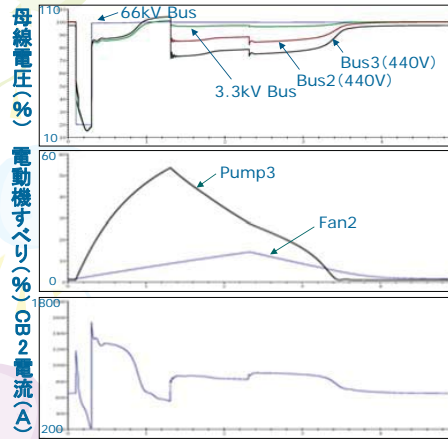


Fig.5 解析結果

【解析条件】

低圧電動機は再閉路方式を採用する例。瞬低条件はFig3と同じ

電圧低下検出レベル	70%
電磁接触器の開路時間	0.02秒
電圧回復検出レベル	80%
Pump3, 4の再閉路時間	電圧回復検出から1.0秒
Fan2の再閉路時間	電圧回復検出から2.0秒

【解析結果】

- ①事故除去後、440V母線電圧は70%を下回らない。
- ②ポンプの回転数は1/2程度に至る。
⇒流量・圧力低下のリスクが増す。Fig4に示す対策等を考慮する必要あり。
- ③幹線フィーダの大電流継続時間は短縮されている。

事例4 の解説

【現象】

瞬低継続中に電磁接触器が開路

補助接点信号がプラントのインターロック(機器停止信号)に使用されており

インターロックが不要動作
電動機は再始動したがプラントは停止した

- ボイラの燃焼ファン、給水ポンプ等は装置停止でインターロック作動させることを求めている。
- しかしながら、本来、プラントのインターロックはプロセス圧力、流量、温度等のプロセス量を検出して構築すべきで、機器停止(電磁接触器開)信号を使用することはなるべく避けるべきである。
- 検出側の信頼性が必要な場合は2 out of 3 ロジックを採用する等の配慮を行う。

事例5 の解析

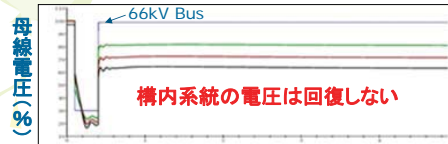


Fig.6 解析結果

瞬低継続時間が長くなると電圧回復は困難となる傾向。

- 電動機のすべり増加で無効電力の消費増大
- 電圧低下で加速トルク減少

【解析条件】

- ①瞬低継続中全ての電磁接触器は閉路を維持
- ②瞬低の電圧低下70%、0.3秒継続

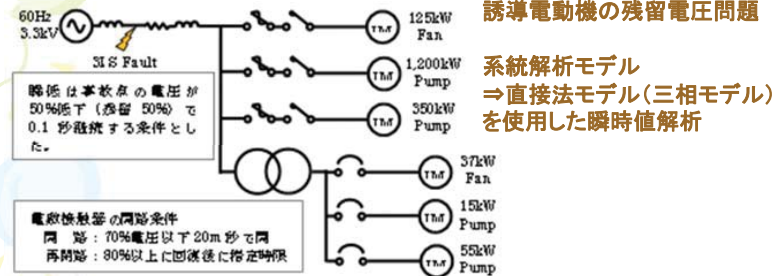
事例1~5 の総合評価

対策方法	効果と課題
瞬低対策として、電動機駆動用電磁接触器が開路(釈放)しないように閉路維持方式を採用することだけでは不十分。	図3, 図6 ①末端系統で電圧回復困難 ②圧力・流量等の変化でプロセス乱れ ③保護協調
順次(グループ)再閉路方式を交えた場合	図5 ①末端系統の電圧安定性で効果あり ②保護協調で効果あり ②プロセスの乱れは避けられない

➢ プロセス側の対策が不可欠となる場合がある ⇒図4

➢ インターロックの構築方法に留意すべき。

事例6&7 の解析



Description	Fan	Pump	Pump	Fan	Pump	Pump
Out put (kW)	125	1,200	350	37	15	55
Volts	3,300	3,300	3,300	440	440	440
Pole	6	2	6	6	6	2
Amperes	26.8	238	77	62	26	86
H (sec)	6.0	0.4	0.4	6.0	0.4	0.4
Actual load (%)	84	84	84	84	84	84

Motor and load data
H : Inertia constant
The torque characteristics are square reduction.

Fig.7 解析モデル

事例6&7 の解析

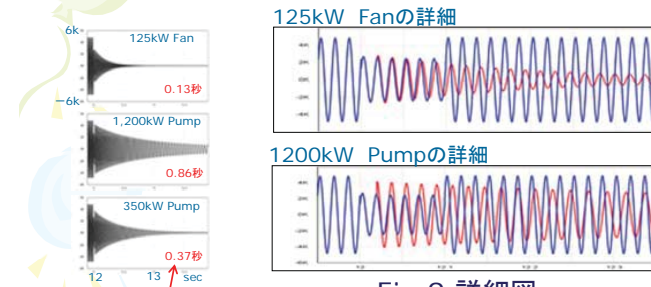


Fig.8 高圧電動機 残留電圧

短絡発生の瞬間から残留電圧が33%に減衰する時間

Fig.9 詳細図

- ▶ 大容量機は残留電圧の減衰が遅い
- ▶ 慣性の小さな負荷(ポンプ等)は位相の遅れが早い
- * 再閉路の際に位相差が大きくなる可能性があり配慮する必要がある。

事例6&7 の解析

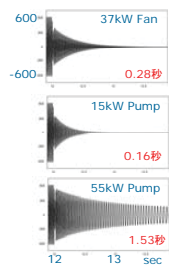


Fig.12 低圧電動機残留電圧

- ▶ 低圧電動機でも残留電圧の減衰時間(33%到達)は1秒を超過するものもある。
- ▶ 高圧電動機と同様の対策が必要な場合がある。

事例6&7 の解析

位相差の大きな再投入 : 6.6kV 1,500kW Fanの計算例
残留電圧と電源電圧の位相差約180°, 残留電圧約38%

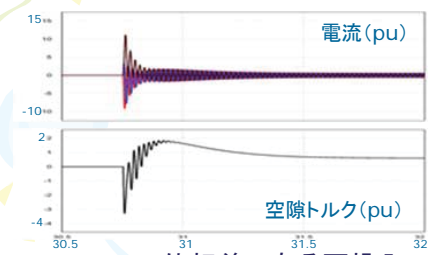


Fig.10 位相差のある再投入

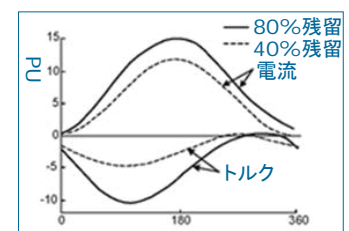


Fig.11 文献(x)

大容量機で回転慣性が必要な場合は文献(x)に示されたデータ(Fig.11)とほぼ一致する。

* NEMAでは一般かご形誘導電動機が許容される残留電圧は33%以下(国内では20~30%程度)とされ、留意すべきである。

事例8&9 の解析

2相短絡で系統電圧が不平衡となり、電動機に流入する電流の不平衡率が大きくなって欠相保護(不平衡検出)が不要動作したもの。

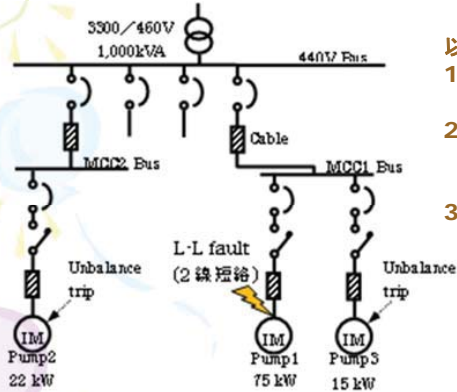


Fig.13 解析モデル

以下、事例9の解説

1. ポンプ1の端子箱で2相短絡発生(施工不良)
2. 短絡はコントロールセンタ(MCC)のMCCCBで2.8秒後に除去された
3. 同一の変圧器から供給される多数の誘導電動機の中から2台のみが欠相保護(不平衡要素)でトリップした。

事例8&9 の解析

電圧波形

電動機電流波形

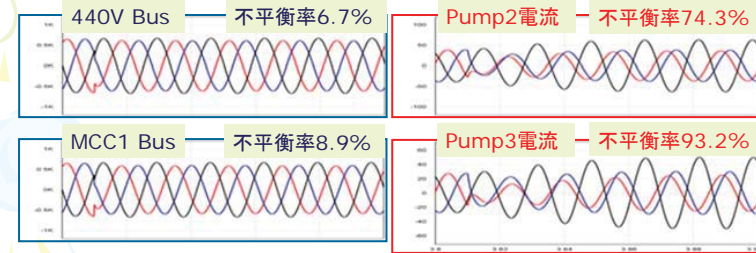


Fig.13 解析モデル

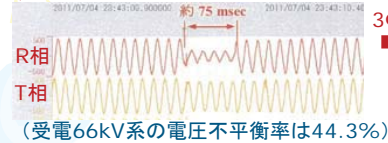
- 電動機保護の不平衡率検出は $60 \pm 10\%$ 、時限 1.5 ± 0.3 秒であった。
- 電動機に流入する電流の不平衡率は電圧の不平衡率の数倍から数十倍となる。
- また、電流の不平衡率はすべりが小さい(軽負荷)ほど増す。当時トリップした2台は軽負荷運転であった。

【対策】：不平衡検出の時限を3秒程度以上としたい。1.5秒固定製品はNG

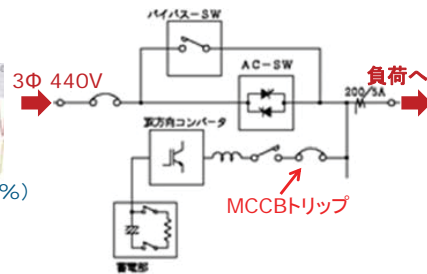
事例10 の解説

440V負荷を補償するための500kVA瞬低補償装置が正常動作しなかった事例。(供給支障トラブル)

装置入力電圧波形



(受電66kV系の電圧不平衡率は44.3%)



瞬低発生時、ACスイッチ(サイリスタ使用)動作と双方向コンバータ出力との協調がとれず、双方向コンバータから電源側に過大な電流が流れ、MCCBがトリップした。

事例10 の解説

【原因】

- 瞬低検出ロジックの問題 : d-q変換法による検出は高速であるが不平衡に弱い側面がある。
- 位相検出方式(PLL)の問題 : 不平衡・波形ひずみに弱い。

【メーカー側の対応策】

上記、瞬低検出ロジックとPLL演算方式の改善。

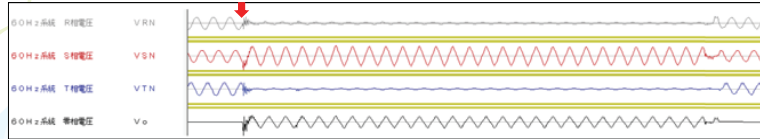
【ユーザー側の対策】

- メーカー側に対し下記試験項目実施を要求。
- (1) IEC 61000-4-27不平衡瞬低試験およびこの不平衡率(6~25%)を上回る瞬低試験
- (2) 繰り返し瞬低試験
- (3) 位相変化を伴う瞬低試験
- (4) 周波数変化、高調波重畳試験等

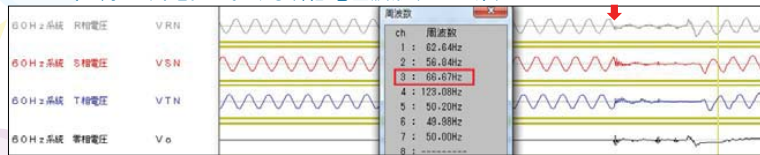
事例10 の補足

実際の瞬低の波形例

2012年8月 九州地区における瞬低電圧波形(66kV系)



2013年7月 九州地区における瞬低電圧波形(66kV系)



- 瞬低は不平衡である場合が多く三相がバランスしていることは稀である。
- 回路の共振により発生瞬時には高調波成分が重畳することが多い。

25

その他の事例と配慮すべき事項

No.	項目	検討すべき事項
1	ガスタービン発電設備のシェアピン破断 * 弊社グループでも経験した	①近傍の短絡でタービン・発電機の軸系に過大なトルクが作用し保護用シェアピンが破断する現象が報告されている。 ②破断を回避するためには (a) 機械軸系のねじり共振問題 (b) 短絡現象の限流効果 等を総合的に検討する必要がある。
2	同期電動機の脱調 (step out)	①継続時間が長く電圧陥没が深い瞬低の場合は脱調が避けられない。(電圧陥没が深い場合、概ね0.2秒以上ではリスクが高い) ②脱調現象は過電流リレーで保護することは困難、インピーダンス形リレーで検出する。
3	自家発電設備を有する場合の系統連系保護と瞬低対策(負荷)の協調	①瞬低で系統連系保護が不要動作しないよう配慮が必要。(順次再閉路方式のタイミングと系統連系保護, 等) ②自立運転に移行した際の電圧安定性, 周波数安定性。(例: 発電機の無効電力発生能力向上対策等)

26

対策検討の方法

検討事項

1. 想定される瞬低規模の決定(頻度, 電圧レベル, 継続時間, 不平衡率, 波形ひずみ)
2. 系統構成の検討
3. 変圧器等の機器容量とインピーダンス等の検討(余裕率の決定)
4. 瞬低対策機器と非対策機器の取捨選択(全てを救うことは困難な場合もあり得る)
5. 誘導電動機の瞬低対策方法検討
6. 再閉路方式および順次再閉路方式における残留電圧問題
7. 保護協調への配慮
8. プロセス側の影響評価と対策

需要家構内の系統であっても系統解析が必要
精度アップ⇒誘導電動機モデル, 負荷モデルの精度アップ要

27